



Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos: propiedades hídricas y durabilidad de las rocas con uso ornamental

Oscar Buj Fandos



Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos: propiedades hídricas y durabilidad de las rocas con uso ornamental

Oscar Buj Fandos

Buj Fandos, Óscar

Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos: propiedades hídricas y durabilidad de las rocas con uso ornamental / Óscar Buj Fandos. — 1.ª ed. — Zaragoza: Consejo Económico y Social de Aragón, 2009. — 250 p.: il; 24 cm. + CD-ROM

ISBN 978-84-693-1502-6

Rocas

Piedras de construcción

691.2

CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN COLECCIÓN TESIS DOCTORALES

Premio Tesis Doctoral del
Consejo Económico y Social de Aragón 2009

Autor de la Tesis Doctoral:

Oscar Buj Fandos

Directores de la Tesis:

Dr. D. Josep Gisbert Aguilar

Calificación obtenida

Sobresaliente cum laude

La responsabilidad de las opiniones expresadas en las publicaciones editadas por el CES de Aragón incumbe exclusivamente a sus autores y su publicación no significa que el Consejo se identifique con las mismas.

La reproducción de esta publicación está permitida citando su procedencia.

© Primera edición CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN

© Para el resto de ediciones el autor

Portada:

Foto: Mario Ayguavives

Composición: AD-HOC Gestión Cultural

Edita:

CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN

C/ Joaquín Costa, 18, 1ª planta. 50071 Zaragoza. España

Teléfono: 976 71 38 38 - Fax: 976 71 38 41

E-mail: cesa@aragon.es

Información internet: <http://www.aragon.es/>

ISBN: 978-84-693-1502-6

D.L.: Z-2784-10

Impresión:

ARPIrelieve, S.A.

Premios a tesis doctorales CESA 2009

El CES de Aragón con el fin de promover y divulgar la investigación en las materias relacionadas con sus funciones convoca anualmente los Premios a Tesis Doctorales, en cuya convocatoria del año 2009, efectuada por Resolución de 8 de septiembre de 2009, de la Presidencia del Consejo Económico y Social de Aragón (BOA nº 178, de 11 de septiembre de 2009), pudieron participar las tesis doctorales presentadas para la colación del grado de doctor, leídas y calificadas de sobresaliente “cum laude”, por unanimidad, entre el 1 de octubre de 2008 y 30 de septiembre de 2009.

Por Resolución de 3 de diciembre de 2009, de la Secretaría General Técnica de la Presidencia (BOA nº 241, de 14 de diciembre de 2009), se otorgaron los premios del CESA a tesis doctorales correspondientes a 2009.

El premio, dotado con 4.000 euros, se otorgó a la tesis doctoral “Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos: Propiedades hídricas y durabilidad de las rocas con uso ornamental”, realizada por D. Óscar Buj Fandos.

El accésit, con una dotación de 3.000 euros, se otorgó a la tesis doctoral “Las causas de extinción del derecho expectante de viudedad aragonés en la Ley 2/2003, de 12 de febrero, de régimen económico matrimonial y viudedad”, realizada por D^a. M^a del Carmen Biesa Hernández.

El Jurado ha estado compuesto por los siguientes miembros:

Presidente: D. José Félix Saenz Lorenzo

Secretaria: D^a. Belén López Aldea

Vocales: D^a. M^a José González Ordovás

D. Ricardo Rodrigo Martínez

D^a. Beatriz Callén Escartín

Nota sobre esta edición

La presente obra es una versión adaptada y resumida de la tesis doctoral “Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos: propiedades hídricas y durabilidad de las rocas de uso ornamental” realizada por su autor, Oscar Buj Fandos, para adaptarla a las necesidades de edición fijadas por el Consejo Económico y Social de Aragón.

Esta publicación incorpora, en toda su extensión, la primera parte de la tesis doctoral en la que se realiza una caracterización tecnológica de cuarenta rocas aragonesas de usos constructivos utilizadas tanto en la actualidad con fines constructivos en obra civil moderna, como a lo largo de los siglos en obras del patrimonio cultural y monumental aragonés. De la segunda parte de la tesis doctoral original se ha seleccionado la caracterización petrofísica de las rocas ornamentales y las piedras de cantería del Valle del Ebro. Esta caracterización ha permitido determinar las características del sistema poroso que controlan el comportamiento físico, mecánico y la durabilidad de los materiales pétreos de usos constructivos.

En cualquier caso, el texto íntegro de la tesis doctoral puede consultarse en el CD que se incorpora a esta publicación.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera expresar mi profundo agradecimiento por su apoyo tanto científico como personal a mi director, el Doctor Josep Gisbert Aguilar, sin el cual esta tesis no hubiera sido posible.

A todos los miembros del grupo de investigación Arbotante (Nacho, Belén, Manu, Pedro, Francesca, Ion, Laura, Pilar, Gema y Ana) por su amistad y su ayuda desinteresada sin el apoyo de los cuales esta tesis no hubiera resultado.

Al Dr. Bernard Smith y a la Dra. Jennifer McKinley de la Queen's University de Belfast por la ayuda brindada en el aprendizaje e interpretación de la técnica de permeabilidad en materiales pétreos, así como al Dr. Miguel Gómez-Heras por el apoyo y la amistad que me brindo en mis estancias en Belfast.

Al Dr. Bargossi y a D. Fausto Peddis por la realización de las porosimetrías de mercurio en la Universidad de Bolonia.

Al Director General del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Publicas (CEDEX) D. Manuel Martín Antón y al Dr. Jesús Soriano Carrillo por brindarme la oportunidad de realizar una estancia de investigación en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.

A los profesores de la Universidad de Zaragoza (Andrés Gil y José Luis Simon), así como a los técnicos de laboratorio (Fernando, Manolo y Quique) que me han ayudado con problemas tanto científicos como técnicos a la hora de diseñar los ensayos.

Al Departamento de Ciencias de la Tierra por acogerme durante estos años para la elaboración de esta tesis doctoral.

Al Gobierno de Aragón y al programa de estancias de investigación Cai Europa, por el apoyo económico recibido.

A D. José Luis Recuenco y Marta Bro por la ayuda desinteresada en el tratamiento estadístico de los resultados de los ensayos tecnológicos.

También quiero mencionar y agradecer la ayuda recibida por numerosas empresas privadas del sector de la piedra natural en Aragón por el suministro de material para la elaboración de las probetas necesarias para la realización de los diferentes ensayos recogidos en esta tesis.

A mi familia, en especial a mis padres y a mi hermana por el cariño, afecto y el apoyo recibido.

Una mención especial es sin duda para Beatriz ya que es la persona que mas ha sufrido las dificultades que surgían a lo largo de esta tesis doctoral.

Y a todas aquellas personas que con su apoyo han hecho posible la elaboración de esta tesis doctoral.

Índice

Resumen	13
I. Introducción	19
I.1. Presentación del trabajo.....	21
I.2. Introducción histórica.....	23
I.3. Introducción terminológica.....	23
I.4. Antecedentes.....	24
II. Objetivos	29
II.1. Caracterización tecnológica de 40 rocas de usos constructivos.....	31
II.2. Caracterización petrofísica y de la durabilidad de 18 rocas ornamentales y piedras de cantería.....	31
II.3. Desarrollo tecnológico de nuevas técnicas y/o perfeccionamiento de las existentes para la caracterización de materiales.....	32
III. Metodología	33
III.1. Introducción.....	35
IV. Situación geográfica y geológica	39
IV.1. Introducción.....	41
IV.2. Unidades Geológicas.....	45
IV.2.1. La Cordillera Pirenaica.....	45
IV.2.1.1. Canteras activas en la Cordillera Pirenaica.....	46
IV.2.2. Depresión Central o Depresión Terciaria del Ebro.....	48
IV.2.2.1. Canteras activas en la Depresión Terciaria del Ebro.....	49
IV.2.3. La Cordillera Ibérica.....	50
IV.2.3.1. Canteras activas en la Cordillera Ibérica.....	51
IV.3. Fichas de situación geográfica y geológica.....	53
V. Caracterización tecnológica	81
V.1. Introducción.....	83
V.2. Fichas tecnológicas.....	85
V.2.1. Información general.....	85
V.2.2. Descripción petrográfica.....	88
V.2.3. Descripción de visu.....	88
V.2.4. Resultados de los ensayos tecnológicos.....	88

V.3.	Interpretación de los resultados de los ensayos tecnológicos.....	162
V.3.1.	Correlación entre características petrográficas y propiedades mecánicas en arenitas.....	163
V.3.1.1.	Correlación entre porosidad y propiedades mecánicas.....	163
V.3.1.2.	Correlación entre mineralogía y textura con las propiedades mecánicas	164
V.3.2.	Correlación entre características petrográficas y propiedades mecánicas en rocas carbonatadas.....	165
V.3.2.1.	Correlación entre porosidad y propiedades mecánicas.....	165
V.3.2.2.	Correlación entre mineralogía y textura con las propiedades mecánicas	166
V.3.3.	Análisis del comportamiento del material	173
V.3.3.1.	Comportamiento hídrico.....	173
V.3.3.2.	Comportamiento mecánico	173
V.3.4.	Adecuación de uso.....	175
V.3.4.1.	Estudio petrográfico	177
V.3.4.2.	Absorción, porosidad	177
V.3.4.3.	Resistencia a compresión uniaxial	178
V.3.4.4.	Resistencia flexión.....	179
V.3.4.5.	Heladicidad	181
V.3.4.6.	Resistencia al choque	182
V.3.4.7.	Resistencia al desgaste por rozamiento	182
V.3.4.8.	Microdureza Knoop.....	183
V.3.4.9.	Resistencia al deslizamiento.....	183
V.3.4.10.	Resistencia al desgaste por abrasión	184
VI.	Caracterización petrofísica de la roca fresca	187
VI.1.	Introducción.....	189
VI.2.	Análisis petrológico y geoquímico de los materiales	193
VI.2.1.	Petrografía.....	193
VI.2.2.	Caracterización geoquímica.....	195
VI.3.	Descripción del sistema poroso	197
VI.3.1.	Distribución porométrica mediante porosimetría de inyección de mercurio (PIM)	197
VI.3.2.	Análisis digital de imágenes	202
VI.4.	Análisis del comportamiento físico	204
VI.4.1.	Estudio del comportamiento hídrico del material.....	204
VI.4.1.1.	Absorción, densidad aparente y porosidad abierta.....	205
VI.4.1.2.	Densidad real método del picnómetro.....	207
VI.4.1.3.	Datos del sistema automatizado (absorción y desorción).....	208
VI.4.1.4.	Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad	217
VI.4.2.	Permeabilidad	221
VI.4.3.	Ultrasonidos	232
VII.	Conclusiones	237

Resumen

La presente tesis doctoral se centra en la caracterización tecnológica de 40 rocas aragonesas, utilizadas tanto en la actualidad con fines constructivos en obra civil moderna, como a lo largo de los siglos en obras que han dejado una particular impronta en el variado patrimonio cultural y monumental aragonés.

Esta caracterización tecnológica se ha realizado mediante paquetes específicos de ensayos normalizados en función de los usos predominantes de los materiales (ornamental, cantería y lajas). A partir de la correlación entre las propiedades físicas y mecánicas con las características petrográficas, se ha establecido una clasificación tecnológica de los materiales pétreos caracterizados en 7 grupos. Para cada uno de estos grupos se han establecido recomendaciones de uso y criterios de calidad técnica.

En una segunda parte se ha realizado la caracterización petrofísica y la evaluación de la durabilidad frente al deterioro por cristalización de sales de las rocas que presentan un mayor interés tanto científico como económico para Aragón: las rocas ornamentales y las piedras de cantería del Valle del Ebro.

Dado que el sistema poroso de las rocas controla en gran medida su comportamiento físico y mecánico, se ha realizado una detallada caracterización del mismo mediante los ensayos hídricos, porosimetría de inyección de mercurio, permeabilidad al gas y análisis digital de imágenes. Este estudio detallado del sistema poroso ha permitido desarrollar la automatización de los ensayos de absorción y desorción para el estudio del comportamiento hídrico de los materiales pétreos y la identificación de los parámetros del sistema poroso que controlan la transmisión de fluidos.

La aplicación de la técnica de la permeabilidad al gas a la caracterización de materiales pétreos de usos constructivos ha permitido evaluar su alterabilidad potencial en los estadios iniciales del deterioro. Con los resultados obtenidos, se han establecido modelos de comportamiento del material en función de las características del sistema poroso.

La durabilidad de estos materiales se ha evaluado mediante el ensayo de cristalización de sales. En los materiales pétreos, que tras la realización del ensayo de cristalización de sales presentaban una pérdida en peso considerable, se ha evaluado la eficacia de tres tratamientos de conservación.

Cómo manejar con soltura esta monografía

Para facilitar la comprensión de este trabajo se ha incluido al comienzo de la memoria, además del índice temático, una tabla resumen con las principales características de las rocas caracterizadas.

Las tablas y figuras aparecen referenciadas por dos números. El primero de ellos (en números romanos) hace referencia al capítulo al que pertenece, mientras que el segundo indica el número de tabla y de figura dentro de cada capítulo mediante numeración arábiga correlativa. Esta numeración permite localizar rápidamente la información en la memoria.

Las 40 variedades pétreas caracterizadas vienen sigladas por números y letras. Los números muestran una ordenación correlativa de las rocas, organizadas según la unidad geológica a la pertenecen, mientras que las letras hacen referencia a la localidad geográfica y nombres comerciales.

La información recogida en la memoria se completa con un anexo de material gráfico.

Tabla resumen de las rocas caracterizadas

Unidad Geológica	Número Sigla	Nombre Científico	Localidad	Variedades
Pirineos	1. Ye	Litoarenita-Sedarenita	Yesa	1
	2. Ma	Litoarenita-Sedarenita	Martes	1
	3. En	Litoarenita-Sedarenita	Ena	1
	4. Hu	Litoarenita-Sedarenita	Fiscal	1
	5. Pa	Litoarenita-Filoarenita	Pueyo de Araguás	1
Depresión del Ebro	6. Un	Calclitita	Uncastillo	1
	7. Ay	Calclitita	Ayerbe	1
	8. Tu	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Cabanillas	1
	9. Fr	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Fraga	1
	10. Az	Calclitita	Alcañiz	1
Cordillera Ibérica	11. Ta	Grauvaca lítica	Tabuena	1
	12. Ca	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Calatorao	3
	13. Pu	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Puebla de Albortón	1
	14. Al	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Alacón	1
	15. Ce	Sparstone	Cuevas-Escucha	1
	16. VI-I	Sparstone	Villarluengo	1
	17. CF	Sparstone	Villarluengo	2
	18. VI-II	Caliza travertínica recristalizada-Sparstone	Villarluengo	1
	19. To	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Villarluengo	1
	20. MI	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Mirambel	1
	21. Cv	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Cantavieja	1
	22. Ig	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Iglesuela	1
	23. Mq1	Biomicrocita-Packstone bioclástico	Mosqueruela	1
	24. Mq2	Pelmicrocita/Biomicrocita-Wackstone de bioclastos y/o peloides	Mosqueruela	4
	25. Pm	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Puertomingalvo	1
	26. No	Intraesparita-Grainstone intraclástico	Nogueruelas	1
Depresión Calatayud Daroca Teruel	27. Tr	Caliza travertínica recristalizada-Sparstone	Villalba Baja	1
	28. Crt	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Tortajada	1
Rama Castellana	29. A	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Abanto	1
	30. D	Sparstone	Abanto	1
	31. BI	Dolosparstone	Blancas	3

I. Introducción

I.1. Presentación del trabajo

Esta tesis doctoral tiene su origen en un proyecto conjunto de la Dirección General de Energía y Minas, Departamento de Industria, Comercio y Turismo del Gobierno de Aragón y de la Universidad de Zaragoza, a partir del cual se encargó la redacción del libro "La Piedra Natural en Aragón" (Gisbert *et al.*, 2004) que incluía la realización de ensayos tecnológicos en "piedras" aragonesas y que abría una oportunidad excepcional para profundizar en el tema que no podíamos desaprovechar.

Desde 1990 el equipo de investigación al que pertenezco desarrolla su labor investigadora centrándose en la aplicación de procedimientos para la caracterización tecnológica de materiales pétreos de usos constructivos, tanto para su aplicación en obra civil moderna como en la conservación y restauración del patrimonio histórico-artístico.

Aragón tiene numerosas e importantes reservas y variedades de piedra natural, consecuencia de la variedad de procesos geológicos que se han desarrollado a lo largo del tiempo en su territorio. Las explotaciones de piedra natural se ubican en formaciones geológicas de edad Mesozoica y Terciaria.

Actualmente, la piedra natural en Aragón supone un importante recurso minero, en pleno desarrollo y crecimiento. No existen explotaciones en activo ni de granito ni de pizarra. En el caso del granito (utilizando este término en sentido comercial) han existido pequeñas explotaciones en afloramientos de rocas subvolcánicas stephano-pérmicas y triásicas en la Ibérica; el más espectacular es la explotación –quizás medieval– de la riolita stephano-pérmica de Pardos (Teruel). En el Pirineo no se explotan los grandes batolitos graníticos debido, por un lado, a la altitud a la que se encuentran y por la intensa fisuración que hace problemático la extracción de bloques industriales y, por otro, al carácter de espacio natural protegido de las posibles áreas canterables.

Históricamente han existido en Aragón explotaciones de pizarras con carácter local. No obstante, dada la gran extensión que presentan los afloramientos de pizarras en la Cordillera Ibérica y el que sean las mismas formaciones que aparecen en el arco Astur-Leonés, donde se encuentran las mayores explotaciones de pizarra del mundo, nos hace pensar que puede haber un importante futuro en Aragón en este sector.

El alabastro no lo hemos incluido por su peculiar composición que lo conforma como un material que necesita unos ensayos y metodología específicos. Se puede añadir que las normas tecnológicas de piedra natural son inaplicables para el alabastro (secado de las probetas a 70°C, inmersión en agua destilada que disuelve el yeso, etc.) y consecuentemente su estudio requiere todo un desarrollo investigador con generación de normas tecnológicas específicas que no hemos pretendido abordar aquí.

En la primera parte de esta Tesis Doctoral se ha realizado una caracterización tecnológica de las principales rocas aragonesas de usos constructivos, para lo que se han seleccionado un total de 40 variedades pétreas, que se encuentran repartidas por todo el territorio aragonés y parte del navarro y, que abarcan un amplio espacio temporal, desde el Mesozoico hasta la actualidad. El criterio de selección de las rocas recogidas en la presente investigación ha sido el de ser variedades pétreas que se explotaban en el año 2004 y cuyos propietarios participaron en el proyecto de elaboración del libro "La Piedra Natural en Aragón", sirviendo el citado proyecto como fuente económica para la realización de parte de los ensayos realizados. Además de estas rocas iniciales, se han sumado a este proyecto aquellas rocas que, o bien se han comenzado a explotar con posterioridad a esta fecha, o bien se han realizado los estudios pre-

vios destinados a su explotación y los industriales han colaborado con el suministro del material y con la co-financiación de los ensayos. Solo ha quedado excluida una piedra aragonesa: la piedra caracoleña, por la dificultad de obtener probetas al estar su producción muy limitada y en vías de desaparición.

Tras la obtención de los diferentes parámetros numéricos de los ensayos, se ha realizado su correspondiente estudio e interpretación, correlacionando las propiedades físicas y mecánicas con las características petrográficas con el objeto de establecer criterios de uso y calidad de estos materiales como elementos de usos constructivos.

La segunda parte de la presente Tesis Doctoral se ha dedicado al estudio de las rocas que presentan un mayor interés tanto económico como científico para Aragón, las rocas ornamentales y las piedras de cantería del Valle del Ebro. El número de rocas caracterizadas en esta segunda parte ha sido de 18, todas ellas incluidas en las 40 rocas sobre las que se había realizado la caracterización tecnológica.

La investigación se ha centrado en una caracterización petrofísica, fundamentalmente del sistema poroso, que se ha realizado antes y después de someter las probetas a diferentes ensayos de cristalización de sales. La evaluación de las modificaciones en las propiedades físicas tras los fenómenos de cristalización de sales junto con las características petrográficas del material han permitido valorar la durabilidad de estos materiales, el movimiento de sales en su interior y predecir el comportamiento que presentarán durante la alteración.

Este estudio petrofísico se ha completado con la evaluación de diferentes tratamientos de conservación, en aquellos materiales que han presentado una pérdida en peso tras el ensayo de cristalización de sales superior al 3%. La gran importancia de la preservación y conservación de la piedra natural radica en que supone el mayor volumen de la estructura arquitectónica de las construcciones de nuestro patrimonio histórico-artístico, el cual está cargado de historia y de cultura.

Esta caracterización tecnológica se ha realizado con un doble objetivo: servir tanto para la caracterización y catalogación de diferentes materiales pétreos utilizados en construcción, como de base para establecer las metodologías de conservación y rehabilitación de edificios contruidos con estos materiales.

Los diferentes ensayos efectuados para caracterizar estos materiales se han realizado siguiendo, en todos los casos posibles, la normativa vigente. En aquellos casos en que no existían ensayos normalizados, ó bien, se han encontrado carencias en la normativa existente se han desarrollado nuevas metodologías. De este modo, y como fruto de las investigaciones realizadas en esta tesis doctoral se está desarrollando una nueva técnica para caracterizar los rangos porométricos en materiales pétreos mediante la utilización de fluidos de baja densidad "Porosímetro de intrusión de fluidos de baja densidad" actualmente en trámites para la obtención de la patente internacional con número de solicitud PCT/ES2006/000681 y fecha de prioridad 22-12-2005.

Los requisitos que deben cumplir los materiales pétreos para ser usados como materiales de construcción vienen determinados tanto por las características tecnológicas del material, como por las características ambientales de exposición. Los criterios de evaluación señalados exigen métodos de análisis y ensayos específicos, siendo la normalización de los mismos, el instrumento técnico que permite garantizar la calidad de las piedras que se comercializan. La normativa permite no sólo unificar conceptos en cuanto a la definición de materiales, sino también en cuanto a sus propiedades.

I.2. Introducción histórica

La piedra natural ha sido el elemento constructivo por excelencia desde la antigüedad debido a su belleza ornamental y a sus cualidades físicas y mecánicas, estando presente en la mayoría del patrimonio cultural inmueble. Los criterios empleados para el uso de la piedra natural como material de construcción eran su belleza y perpetuidad, aunque ha quedado patente como la alteración de la piedra tiene lugar desde el mismo momento que es extraída en la cantera y expuesta a unas condiciones diferentes a las de su génesis, para alcanzar el equilibrio con el nuevo entorno y sus exigencias. El interés por la durabilidad de los materiales pétreos de usos constructivos no es nuevo, Vitruvio ya enunció en siglo I (a.C) "la durabilidad debe ser asegurada cuando se seleccionen libremente los materiales destinados a una construcción de importancia...".

Con el paso del tiempo y de las diferentes civilizaciones, ha evolucionado el uso de la piedra natural. Su empleo como material de construcción arquitectónico se remonta a la prehistoria, siendo en el antiguo Egipto cuando este sector tuvo un gran auge con el desarrollo de la extracción, propiedades constructivas y las herramientas para trabajar la piedra. El primer uso de la piedra natural fue como piedra seca y probablemente en tipos fisiles o lajas. La labra de sillares permitió un avance arquitectónico importantísimo al convertir a la piedra en un elemento estructural mejor que la madera.

Los romanos fueron los primeros en generalizar el uso de tableros de piedra con finalidad exclusivamente decorativa y en comercializar distintos tipos de rocas en todo el "Mare Nostrum". Esta situación se recupera (tras el retroceso en la Edad Media) en el siglo XIX. En el siglo XX el hormigón desplaza a la piedra en su finalidad estructural y el valor ornamental se convierte en la principal plusvalía de la roca que empieza a considerarse como una "piel" decorativa del edificio. Hay que señalar la irrupción –en la segunda mitad del siglo– de los ensayos normalizados que –en sus comienzos– tienen un valor más burocrático que operativo.

El siglo XXI, además de por un comercio mundial de rocas, se caracteriza por la aplicación de la esencia tecnológica de los ensayos a la adecuación de uso de cada piedra, la aparición de "copias" cerámicas para el uso ornamental y de toda una gama muy amplia de materiales artificiales que pretenden sustituir a la piedra en sus usos constructivos. La batalla se presenta en los criterios de calidad, ya que los materiales artificiales poseen unas propiedades más constantes y controlables (color, homogeneidad, fisuras) que las partidas de piedra natural.

En los últimos años y debido a las nuevas tecnologías, gracias a las cuales se han conseguido lograr espesores menores y un perfeccionamiento en los acabados, se han desarrollado nuevos usos. El uso de la piedra natural abarca múltiples aplicaciones desde el recubrimiento ornamental con placas de espesores cada vez más finos, aumentando así el valor añadido de cada bloque extraído en cantera, hasta los pavimentos y acabados rústicos con lajas pasando por la piedra labrada. Este desarrollo tecnológico, que estamos experimentando actualmente, también es el responsable del endurecimiento de las condiciones atmosféricas, que son en gran medida las responsables del deterioro de las rocas.

I.3. Introducción terminológica

Los materiales pétreos utilizados como elementos de usos constructivos en arquitectura se designan con el término de "piedra natural". Este término engloba a todas aquellas rocas que son susceptibles de ser utilizadas como elemento constructivo (resistencia y durabilidad suficientes) que tras ser extraídas, pueden ser dimensionadas y sometidas a diversos tratamien-

tos en su superficie y conservan su composición, textura y características físicas, mecánicas y químicas. En esta definición se agrupan diversos tipos de rocas con diferencias geológicas significativas.

Tradicionalmente el término genérico de piedra natural se divide, desde una óptica comercial, en dos grandes grupos, la Piedra de Cantería o Piedra Natural de Construcción (Regueiro y Quereda, 1994) y las Rocas Ornamentales que a su vez se subdividen en Mármoles, Granitos y Pizarras.

- Piedra de Cantería o Piedra Natural de Construcción: En general, en esta categoría se incluyen todas las rocas que no admiten pulido sin adición de productos coadyuvantes: areniscas, cuarcitas, calizas no pulimentables, alabastro etc.
- Rocas Ornamentales: En esta categoría se incluyen las rocas en las que el proceso de pulido tiene lugar por procedimientos puramente físicos sin necesidad de añadir productos químicos que se incluyan en el material a pulir.
 - Mármoles, calizas marmóreas y similares. Esta denominación incluye los mármoles propiamente dichos, calizas recristalizadas, compactas, de grano fino y a veces con inclusión de fósiles, dolomías, travertinos y serpentinas.
 - Granitos y similares. Este grupo incluye, además del granito propiamente dicho en sus distintas variedades, a pegmatitas, granodioritas, monzonitas, tonalitas, dioritas y gneises.
 - Pizarras. Esta denominación incluye, además de la pizarra propiamente dicha, a calizas tableadas.

Las subdivisiones de la piedra natural realizadas desde el punto de vista comercial en base a criterios que no se corresponden con los geológicos suele generar errores de concepto, lo cual en ocasiones lleva a confusión. Este problema se deriva de que la terminología utilizada está abierta a interpretaciones subjetivas y parciales y, por lo tanto, carentes de validez.

La ausencia de una terminología y clasificación normalizada aceptada universalmente en el sector de la piedra natural era una fuente continua de problemas a nivel técnico y comercial, ya que los términos comerciales, que presentan una definición muy exacta desde el punto de vista de la Petrología, engloban diferentes tipos de roca, que presentan una propiedades físicas y mecánicas muy diferentes entre sí. Por ello, la clasificación comercial resulta ambigua y en muchos casos incorrecta. Actualmente la norma Europea UNE-EN 12670:2003 establece la base terminológica para la definición petrológica de la piedra natural y su clasificación. Esta norma cubre los campos de la geología, minería y elaboración y comercialización de los productos de piedra natural. Nosotros seguimos esta norma con las precisiones explicadas en el capítulo V.2.1.

1.4. Antecedentes

En este punto se han recogido los antecedentes generales ya que luego en cada uno de los capítulos se procede a citar de una forma estricta todo el material consultado y/o utilizado.

La correcta caracterización y adecuación de uso de los materiales pétreos porosos de usos constructivos es de gran importancia tanto desde el punto de vista de la conservación del patrimonio arquitectónico y cultural, como desde el punto de vista económico, por el uso generalizado de estos materiales en obra civil moderna.

La utilización de los materiales pétreos de usos constructivos, precisa establecer sus propiedades desde un punto de vista físico y mecánico, mediante parámetros que cuantifican

determinados aspectos o comportamientos. Dichas propiedades dependen de sus características petrográficas (Montoto, 1983; Esbert y Ordaz, 1985; Winkler, 1996) y presentan un notable interés como indicadores de la calidad técnica de las rocas, ya que condicionan el uso de los materiales pétreos en construcción y su alterabilidad y/o durabilidad (Montoto, 1983; Alonso, 1986). Así mismo, es fundamental conocer la fábrica o estructura física del material y su sistema poroso. El sistema poroso va a gobernar el comportamiento físico-mecánico de las rocas, el transporte de fluidos en su interior y su durabilidad (Honeyborne and Harris, 1958; Hammecker, 1995; Fitzner, 1990).

Con el objetivo de establecer criterios sobre calidad y adecuación de uso de materiales pétreos se han correlacionado las características físicas con las características mecánicas de los materiales. Está ampliamente reconocido el papel de la porosidad como parámetro que controla el resto de las propiedades de las rocas, y diferentes investigadores han establecido relaciones entre porosidad y resistencia mecánica a compresión uniaxial tanto para areniscas (Hoshino, 1974; Bell, 1978; Shakoor and Bonelli, 1991; Vernik *et al.*, 1993; Ulusay *et al.*, 1994), como para rocas carbonatadas (Kossev, 1970; Smorodinov *et al.*, 1970; Tugçerul and Zarif, 2000; Palchik and Hatzor, 2002). Las conclusiones generales, indican un aumento en la resistencia mecánica con la disminución de la porosidad. Alfes (1991) demostró la influencia del tamaño de poro en la resistencia de los materiales, indicando una alta dependencia en areniscas con baja porosidad entre resistencia y tamaño de poro. Sayed *et al.*, (1999), además de confirmar los datos anteriores, indicó la existencia de una relación positiva entre resistencia a compresión y densidad aparente.

La durabilidad de una roca se puede definir como su capacidad para resistir y mantener el mismo tamaño, forma, propiedades mecánicas y aspecto estético a lo largo del tiempo (Bell, 1993), para una posición en obra y unas condiciones climáticas y medio ambientales definidas (Shadmon, 1993), dependiendo de la velocidad de esta alteración de las características intrínsecas del material (Torraca, 1986).

La alteración se define como un proceso o conjunto de procesos destructivos por los cuales los materiales pétreos expuestos a los agentes atmosféricos cambian su color, textura, composición, resistencia y forma (Jackson, 1977). El tallado de la roca tras su extracción origina un aumento notable de su superficie específica y por lo tanto en la velocidad de su degradación. Caracterizar las interacciones entre materiales pétreos tras su puesta en obra y las características ambientales es clave para entender su deterioro. Aunque la alteración de los materiales pétreos es un proceso natural, en las últimas décadas ha tenido lugar un importante aumento en la velocidad de su deterioro como consecuencia del aumento de los contaminantes ambientales tales como SO_2 , NO_x , H_2SO_4 , HNO_3 (Baer and Sneathlage, 1997).

En el siglo XIX comenzaron a realizarse los primeros estudios de detalle sobre la alterabilidad de los materiales naturales en edificios históricos, aunque ya desde el siglo I a.C. existen referencias sobre requisitos de durabilidad en materiales pétreos usados en los monumentos de Roma.

En el siglo XX se sentaron las bases de los actuales estudios de alteración y durabilidad de materiales pétreos mediante una serie de trabajos detallados sobre la piedra natural de usos constructivos y su deterioro, en los que se exponían las causas y mecanismos que originaban las formas de deterioro existentes (Howe, 1910; Watson, 1911; Hirschwald, 1912 y Schaffer, 1932). En la primera mitad de este siglo se realizaron las primeras evaluaciones de una amplia gama productos de conservación en monumentos (Walter, 1903; Rathgen, 1915) y en la segun-

da mitad se comenzaron a utilizar con asiduidad estos productos (consolidantes e hidrofugantes) para conservar y prolongar la vida útil del material pétreo bien mediante la prevención o bien retardando la alteración del material reestableciendo la integridad de la parte alterada (Torraca, 1976; Laurenzi-Tabasso *et al.*, 1985).

Existen numerosos y variados procesos de alteración que pueden afectar a la piedra natural entre los que se pueden destacar procesos químicos como, por ejemplo, los efectos de la contaminación atmosférica (Simão *et al.*, 2006; Zappia *et al.*, 1992) o fenómenos de disolución de rocas (Morse and Arvidson, 2002; Maropoulou *et al.*, 1998; Winkler, 1987; Hoke y Turcotte, 2004), alteración física como la cristalización de sales y la heladicidad (Matsouka, 1988; Scherer, 1999; Benavente *et al.*, 2004) o fenómenos asociados a expansión hídrica (Snethlage and Wendler, 1997; Hall and Hall, 1996; Delgado Rodrigues, 2001) y a la dilatación térmica (Gómez Heras *et al.*, 2004).

En la presente investigación nos vamos a centrar en los procesos de alteración física consecuencia de la heladicidad y especialmente en la alteración debida a la cristalización de sales en el interior de los materiales pétreos.

El efecto de la acción del hielo en el deterioro de los materiales pétreos es bien conocido (Hirschwald, 1908; Kieslinger, 1930). Este efecto depende de la distribución de tamaños de poro, de la humedad relativa y del grado de saturación. Las tensiones generadas en el interior del material por el aumento de volumen en el paso de agua a hielo pueden desencadenar la aparición de fisuras y grietas, lo que implica una disminución de su resistencia mecánica. Aquellas rocas con tamaño medio de poro superior a 0,005 mm presentan un mejor comportamiento frente a este tipo de alteración (Bell, 1993).

La cristalización de sales solubles en el interior del sistema poroso de los materiales pétreos se considera el principal mecanismo de deterioro en monumentos de patrimonio cultural (Correns, 1949; Wely, 1959; Evans, 1970; Franzini, 1995; Price, 1996; Benavente *et al.*, 1999; Rodríguez Navarro & Dohene, 1999; Scherer, 1999; Flat, 2002). Esta puede producirse en la superficie generando desintegración granular y descamación o bien en capas subsuperficiales durante el secado de los materiales generando desplazaciones (Smith and McGreevy, 1988; Goudie and Viles, 1995). La consecuencia es el daño estructural y la pérdida de material.

Los múltiples deterioros que pueden originar las sales son debidos a la presión de cristalización que depende de la temperatura y del grado de sobresaturación de la solución (Winkler and Singer, 1972) y a la presión de hidratación que depende de la temperatura ambiente y de la humedad relativa (Winkler and Wilhelm, 1970).

Los procesos de cristalización de sales en el interior de los materiales pétreos de usos constructivos tienen implicaciones en el comportamiento del material, en sus limitaciones de uso en obra civil moderna y en las estrategias de restauración-rehabilitación de nuestro patrimonio.

La degradación de los materiales pétreos por este proceso está estrechamente relacionada tanto con las características petrofísicas de la roca como con las sales que están cristalizando en su interior, siendo el sistema poroso y su dureza-cohesión las propiedades petrofísicas que presenta una mayor influencia en su durabilidad. El sistema poroso controla el movimiento de fluidos en el interior del material pétreo y por lo tanto la posición en la que tienen lugar los procesos de cristalización de sales (Hammecker, 1995; Rodrigues-Navarro and Doehne, 1999). Diferentes estudios experimentales han mostrado que la porosidad y la distribución de tamaños de poros ejercen una gran influencia en la susceptibilidad de los materiales pétreos a la alteración (McGreevy, 1996; Ordoñez *et al.*, 1997).

Los dos factores fundamentales que gobiernan la alteración en las rocas son la distribución de tamaños de poros y la resistencia mecánica (Niesel, 1983). Entender la relación entre estas dos propiedades puede ser útil para predecir el comportamiento futuro de la roca.

Existen diferentes modelos teóricos para explicar los mecanismos de deterioro por cristalización de sales en el interior de materiales pétreos.

- a) Correns (1949), postuló que un cristal de sal puede crecer bajo una presión de confinamiento si existe una película de solución sobresaturada entre el cristal en crecimiento y la pared del poro. Este es el trabajo de referencia por excelencia respecto a la termodinámica del fenómeno de la cristalización de sales.
- b) Weyl (1959), considera el postulado propuesto por Correns como un caso especial y propone un modelo general para entender la presión de cristalización de los minerales como el opuesto al proceso de presión-disolución. Weyl postuló que el crecimiento de una cara de un cristal necesita la presencia de una solución sobresaturada entre el cristal y el sólido que los confina.
- c) Wellmann and Wilson (1965, 1968) desarrollan un modelo termodinámico para calcular la presión de cristalización de las sales considerando que la energía libre de un sólido se incrementa con su área superficial. Afirman que los cristales crecen primero en los poros mayores como confirmaron Putnis and Mauthe (2001), donde la energía requerida es menor que en los poros de menor tamaño. La solución residual en los poros mas pequeños representa un reservorio para el crecimiento de sales en los poros mayores, que siguen creciendo generando presiones contra las paredes del poro que finalmente pueden desencadenar en el deterioro del material si la presión generada es mayor que la cohesión del material (Rodríguez Navarro and Doehne, 1999). Por lo tanto esta teoría sugiere que aquellas rocas con grandes capilares separados por microporos serán más susceptibles al deterioro por cristalización de sales.
- d) Otros mecanismos de alteración por cristalización de sales son la presión de hidratación (Kwaad, 1970; Sperling and Cooke, 1985; Fahey, 1986; Charola and Weber, 1992; Doehne, 1994), la expansión térmica (Cooke and Smalley, 1968; Chapman, 1980; Johannessen *et al.*, 1982), la alteración química (McGreevy, 1985; Young, 1987; Mottershead and Pye, 1994), la presión osmótica (Winkler, 1970, 1994) y la presión hidráulica (McMahon, 1992).

La durabilidad de las rocas caracterizadas se ha evaluado mediante el ensayo de envejecimiento artificial de cristalización de sales, en el que se trata de reproducir los procesos naturales en laboratorio de una forma acelerada (Dearman, 1982; Martin *et al.*, 1992; Rivas *et al.*, 1998). Estos ensayos se han utilizado desde 1828 y permiten valorar la capacidad de resistencia de los materiales pétreos de usos constructivos frente a la acción de los agentes atmosféricos (Evans, 1970; Price, 1978). La estimación de la durabilidad de los materiales pétreos permite su buena utilización como material de construcción.

II. Objetivos

II.1. Caracterización tecnológica de 40 rocas de usos constructivos

Estos materiales tienen una gran importancia tanto por su actual empleo en el sector de la piedra natural como materiales de usos constructivos, como por su intensa utilización a lo largo de los siglos para la construcción de obras que han dejado una particular impronta en el variado patrimonio cultural y monumental aragonés.

Objetivos específicos:

1. Caracterización tecnológica de las rocas aragonesas de usos constructivos.
2. Establecer criterios de selección que permitan dictar recomendaciones de uso en función de las características intrínsecas del material.
3. Establecer criterios de calidad mediante correlaciones entre las propiedades físicas y mecánicas con la composición y textura de los materiales pétreos.

II.2. Caracterización petrofísica y de la durabilidad de 18 rocas ornamentales y piedras de cantería

Para esta parte del trabajo se han seleccionado las rocas que se comercializan como rocas ornamentales y aquellas que comercializándose como piedras de cantería presentan un mayor valor tanto científico como histórico por su uso a lo largo del tiempo. En estas rocas, además de su caracterización tecnológica, se ha realizado un exhaustivo estudio petrofísico antes y después de someter las probetas a diferentes ensayos de cristalización de sales. Finalmente, se ha completado el estudio evaluando la durabilidad frente al deterioro por cristalización de sales tanto en la roca fresca como en la roca tratada con diferentes productos consolidantes.

Queremos mencionar explícitamente a la caliza campanil, ya que aunque en Aragón tiene un uso constructivo limitado, se ha incluido con materiales procedentes de una cantera aragonesa y de otra navarra. Esto se debe a que se ha detectado una propiedad (expansión durante el secado en presencia de sales de magnesio) de consecuencias muy graves para su uso constructivo y, por tanto, resultaba un tema de gran interés para incluir como desarrollo investigador.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el sistema poroso y sus modificaciones tras la cristalización de soluciones salinas.
2. Analizar la dinámica del agua en el interior del sistema poroso de los materiales pétreos. Interacciones agua-aire y variaciones en los procesos de absorción y desorción de agua tras la aplicación de consolidantes.
3. Predecir el comportamiento del material durante la alteración por cristalización de sales, modelizar el movimiento de las diferentes soluciones salinas en el interior de los materiales pétreos e identificar los puntos potenciales de deterioro.
4. Modelizar los cambios de tamaño en la caliza campanil por procesos de cristalización de sales de sulfato de magnesio.
5. Evaluar la durabilidad de estos materiales frente al ensayo de envejecimiento artificial acelerado de cristalización de sales realizado con diferentes soluciones salinas.
6. Investigar soluciones a los problemas de deterioro; evaluación de tres tratamientos de conservación.

II.3. Desarrollo tecnológico de nuevas técnicas y/o perfeccionamiento de las existentes para la caracterización de materiales

Para la consecución de los objetivos propuestos en los puntos anteriores fue necesario el desarrollo de nuevas técnicas o bien la adecuación de las técnicas preexistentes.

1. Desarrollar técnicas automatizadas para los ensayos de absorción y desorción para obtener un registro continuo y detallado de la cinética de estos procesos durante la realización del ensayo.
2. Desarrollar un sistema de medida automatizado de expansión lineal para monitorizar los cambios longitudinales a lo largo de todo el ensayo y caracterizar los cambios de volumen asociados a los procesos de cristalización de sales.
3. Aplicación de técnicas estadísticas a los resultados obtenidos a partir del ensayo de permeabilidad al gas, para determinar las zonas de mayor alterabilidad potencial en materiales pétreos.

III. Metodología

III.1. Introducción

La metodología de trabajo dentro del campo de la Piedra Natural como material de construcción es muy variable en función de los objetivos del trabajo.

El plan de trabajo parte de la necesidad de caracterizar los materiales pétreos de usos constructivos con el fin de obtener tanto criterios de calidad, adecuación de uso e indicadores de la durabilidad de esos materiales, así como la generación de desarrollo tecnológico.

Inicialmente y previo al trabajo de campo se realizó un estudio bibliográfico sobre el contexto y características geológicas de las zonas donde se localizan las canteras. En campo, se procedió al estudio de los afloramientos en los que son explotados actualmente estos materiales y se realizaron muestreos representativos en los frentes activos de las canteras tomando precauciones a la hora de seleccionar los bloques de material de manera que presentaran la menor alteración y fisuración posible, con el fin de establecer una relación entre las variedades presentes, sus calidades y las facies sedimentológicas. A partir de estos bloques convenientemente siglados y orientados se tallaron las probetas para la realización de los diferentes ensayos.

Una vez acondicionadas las probetas, se realizaron diferentes ensayos normalizados para determinar las propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad de estos materiales. Los ensayos se realizaron en todos los casos posibles según los protocolos indicados en las normas vigentes.

El Comité Europeo de Normalización –CEN– es el encargado de armonizar las normativas propias de los países europeos. Para el sector de la Piedra Natural existen cuatro comités:

CEN/TC 125/WG1/TG6 "Piedra natural, Mampostería".

CEN/TC 128/SC8 "Pizarras".

CEN/TC 178/WG2 "Pavimentos de piedra natural para usos exteriores".

CEN/TC 246 "Piedra natural".

En España la normativa de rocas ornamentales esta regulada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) que fue creada en Febrero de 1986 y se encarga de la redacción de las normas UNE.

En los casos en que las normas UNE no incluían los ensayos que se pretendían realizar, estos se desarrollaron según otras normativas (el ensayo de dureza superficial Shore-D se ha realizado según la norma ASTM) o bien se han realizado según ensayos diseñados por nuestro equipo de investigación. Además, esta investigación ha permitido el desarrollo tecnológico de una nueva técnica para la cuantificación de porosidad en materiales.

Finalmente, se procedió a la recopilación e interpretación de los datos obtenidos durante la realización de los diferentes ensayos, a partir de los cuales se obtuvieron las conclusiones que se expondrán en los capítulos posteriores.

Desde el año 2004 en el que se comenzaron a realizar los ensayos tecnológicos de caracterización recogidos en la presente tesis doctoral, varias de las normas utilizadas han sufrido ligeras modificaciones. En ningún caso, las modificaciones realizadas en las normas suponen una gran incidencia en los resultados obtenidos con las normas antiguas, dado que los cambios no han afectado ni al procedimiento del ensayo ni a las dimensiones de las probetas; aunque en todos los casos los ensayos se llevaron a cabo con la norma en vigor en la fecha de su realización.

La norma "Mármoles y calizas ornamentales. Resistencia al choque UNE 22-189-85" ha sido sustituida por la norma "Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la energía de rotura UNE-EN 14158:2004". La diferencia entre ambas normas reside en la altura

inicial de caída del peso vertical siendo de 10 cm en la norma vigente y de 5 cm en la norma anulada.

La norma “Mármoles y calizas ornamentales. Microdureza Knoop UNE 22-188-85” ha sido sustituida por la norma “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la dureza Knoop. UNE-EN 14205:2004”. La diferencia entre ambas normas reside en la variación en el espaciado entre las medidas, siendo menor para la norma actual.

En el año 2007 se sustituyeron las normas “Métodos de ensayo para la piedra natural: Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial UNE-EN 1926:1999” y “Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada UNE-EN 12372:1999” por las normas UNE-EN 1926:2007 y UNE-EN 12372:2007 respectivamente. La principal diferencia entre ambas normas es el cambio en el número de probetas de cada tanda necesarias para la realización del ensayo que pasa de ser tandas de 6 a tandas de 10 probetas.

Los ensayos realizados en laboratorio para la caracterización del material se han dividido en cuatro bloques: caracterización petrológica y mineralógica, caracterización física, caracterización mecánica y durabilidad. En la versión digital se incluyen la descripción de los diferentes ensayos realizados, el interés tecnológico de su realización, los equipos con los que se han realizado y los laboratorios en los que se han llevado a cabo los ensayos.

Los ensayos y técnicas analíticas que han sido utilizadas para la caracterización tecnológica (capítulo V), caracterización petrofísica (capítulo VI), evaluación de los procesos de cristalización de sales (capítulo VII) y evaluación de tratamientos de conservación (capítulo VIII) se muestran en la tabla III-1.

■ TABLA III.1

Capítulos de la memoria en que se describen los resultados de los ensayos y técnicas analíticas utilizadas

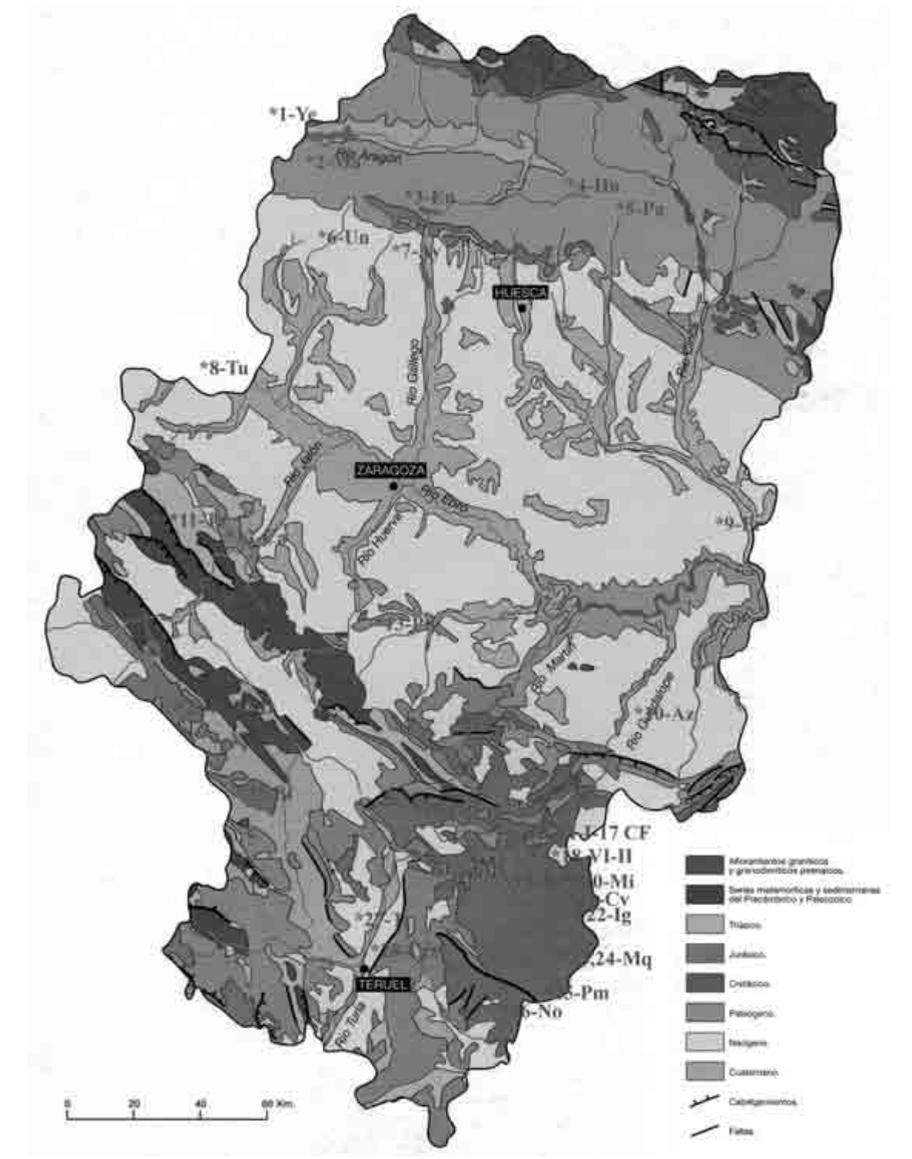
Ensayos-técnicas analíticas	Capítulo V	Capítulos VI-VII-VIII
Microscopía petrográfica	-----	-----
Microscopía electrónica de barrido	-----	-----
Análisis digital de imágenes	-----	-----
Análisis químicos de elementos mayores	-----	-----
Determinación del contenido en carbonato	-----	-----
Determinación del residuo insoluble	-----	-----
Absorción, densidad aparente y porosidad	-----	-----
Absorción y desorción continua	-----	-----
Coefficiente de absorción capilar	-----	-----
Densidad real método del picnómetro	-----	-----
Porosimetría de inyección de mercurio	-----	-----
Dilatación lineal, Expansión volumétrica y anisotropía de susceptibilidad magnética	-----	-----
Ultrasonidos.	-----	-----
Permeabilidad	-----	-----
Dureza superficial Shore D	-----	-----
Cristalización de sales	-----	-----
Colorimetría	-----	-----
Resistencia a la compresión uniaxial	-----	-----
Resistencia a la flexión	-----	-----
Resistencia al desgaste por abrasión	-----	-----
Desgaste por rozamiento	-----	-----
Resistencia al deslizamiento sin pulimento	-----	-----
Resistencia al choque	-----	-----
Microdureza Knoop	-----	-----
Planeidad	-----	-----

IV. Situación geográfica y geológica

Desde el punto de vista geológico en Aragón se pueden distinguir tres grandes unidades: la Cordillera Pirenaica, la Cordillera Ibérica y la Depresión Central o Depresión Terciaria del Ebro (figura IV-2). Estas tres unidades que aparecen en el territorio aragonés no son exclusivas del mismo, extendiéndose sus márgenes más allá de la comunidad autónoma de Aragón.

■ FIGURA IV.2

Mapa geológico de Aragón con la ubicación de las explotaciones caracterizadas (Modificado de Peña Monné, 1995)



■ TABLA IV.1

Cuadro resumen de las características geológicas de las rocas caracterizadas

Unidad Geológica	Número Sigla	Edad	Formación	Variaciones
Pirineos	1. Ye	Eoceno (Priabonense)	Fm. Margas de Pamplona	1
	2. Ma	Eoceno (Bartoniense)	Fm. Belsué-Atarés	1
	3. En	Eoceno (Biarritzense)	Fm. Campodarbe	1
	4. Hu	Eoceno (Cuisiense-Luteciense)	Grupo Hecho	1
	5. Pa	Eoceno (Cuisiense-Luteciense)	Grupo Hecho	1
Depresión del Ebro	6. Un	Mioceno (Aquitaniense-Burdigaliense)	Fm. Uncastillo	1
	7. Ay	Mioceno (Aquitaniense-Burdigaliense)	Fm. Uncastillo	1
	8. Tu	Mioceno Aquitaniense	Fm. Tudela	1
	9. Fr	Mioceno (Aquitaniense-Turolense)	Torrente Cinca-Alcolea del Pinar	1
	10. Az	Mioceno (Aquitaniense)	Fm. Caspe	1
Rama Aragonesa	11. Ta	Triásico Inferior	Facies Buntsandstein	1
	12. Ca	Jurásico Medio (Bathonense)	Fm. Chelva	3
	13. Pu	Jurásico Superior (Titónico)	Fm. Higeruelas	1
	14. Al	Cretácico Inf. (Barremiense-Aptiense)	Fm. Alacón	1
	15. Ce	Cretácico (Albiense-Cenomaniense)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1
	16. VI-I	Cretácico superior (Cenomaniense)	Fm. Órganos de Montoro	1
	17. CF	Cretácico superior (Cenomaniense)	Fm. Órganos de Montoro	2
	18. VI-II	Mioceno		1
	19. To	Cretácico (Albiense-Cenomaniense)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1
	20. MI	Cretácico Inferior (Bedouliense)	Fm. Calizas y margas de Chert	1
	21. Cv	Cretácico Inferior (Albiense)	Fm. Calizas Ocre de Benasal	1
	22. Ig	Cretácico Inferior (Albiense)	Fm. Calizas Ocre de Benasal	1
	23. Mq-1	Cretácico (Albiense-Cenomaniense)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1
	24. Mq-2	Cretácico (Albiense-Cenomaniense)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	4
	25. Pm	Cretácico (Albiense-Cenomaniense)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1
	26. No	Cretácico Inferior (Albiense)	Fm. Calizas Ocre de Benasal	1
Depresión Calatayud Daroca Teruel	27. Tr	Mioceno		1
	28. Crt	Mioceno (Turolense)	Calizas y margas Turolenses	1
Rama Castellana	29. A	Cretácico sup. (Turoniense-Coniaciense)	Fm. Embalse de la Tranquera	1
	30. D	Cretácico sup. (Turoniense-Coniaciense)	Fm. Embalse de la Tranquera	1
	31. BI	Cretácico sup. (Turoniense-Coniaciense)	Fm. Barranco de los Degollados	3

Cordillera Ibérica

TABLA IV.2

Cuadro síntesis de clasificación de las rocas caracterizadas

Número-Sigla	Nombre científico	Nombre comercial	Localidad
Rocas detríticas			
1. Ye	Litoarenita Calcárea-Sedarenita	Piedra de Yesa	Yesa
2. Ma	Litoarenita Calcárea-Sedarenita	Piedra de Martes	Martes
3. En	Litoarenita Calcárea-Sedarenita	Piedra de Ena	Ena
4. Hu	Litoarenita Calcárea-Sedarenita	Piedra Alto-Aragón	Fiscal
5. Pa	Litoarenita-Filoarenita	Piedra de Pueyo	Pueyo Araguás
6. Un	Calclitita	Piedra de Uncastillo	Uncastillo
7. Ay	Calclitita	Piedra de Ayerbe	Ayerbe
10. Az	Calclitita	Piedra de Alcañiz	Alcañiz
11. Ta	Grauvaca lítica	Laja de Tabuena	Tabuena
Rocas carbonatadas			
8. Tu	Biomícrita Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Cabanillas
9. Fr	Biomícrita Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Fraga
12. Ca1	Biopelmícrita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
Ca2	Biopelmícrita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
Ca3	Biopelmícrita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
13. Pu	Biopelmícrita-Wackstone de bioclastos y peloides	Amarillo Puebla	Puebla de Albornón
14. Al	Biomícrita-Wackstone bioclástico	Oro Viejo, Antigua	Alacón
15. Ce	Sparstone	Fósil Blanca	Cuevas-Escucha
16. VI-I	Sparstone	Crema Maestrazgo	Villarluengo
17. CF-I	Sparstone	Crema Fósil Inferior	Villarluengo
CF-S	Sparstone	Crema Fósil Superior	Villarluengo
18. VI-II	Caliza travertínica recristalizada-Sparstone	Travertino Nogal Montoro	Villarluengo
19. To	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Piedra caliza Torre Villares	Villarluengo
20. MI	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Losa Ocre	Mirambel
21. Cv1	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Laja Verde	Cantavieja
Cv2	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Paja	Cantavieja
22. Ig	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Amarilla Cortes, Laja Oro, Laja Plata	Iglesuela
23. Mq-1	Biomícrita-Packstone bioclástico	Fósil Blanca, Fósil Amarilla, Gris Raíces	Mosqueruela
24. Mq-21	Pelmícrita-Wackstone de peloides y bioclastos	Ciega Blanca	Mosqueruela
Mq-22	Biomícrita-Wackstone de bioclastos y peloides	Ciega Gris	Mosqueruela
Mq-23	Biopelmícrita-Wackstone de bioclastos y peloides	Gris Verde Monte	Mosqueruela
Mq-24	Biopelmícrita-Wackstone de bioclastos y peloides	Blanca Paja	Mosqueruela
25. Pm	Biomícrita-Wackstone bioclástico	Losa Blanca, Fósil Blanca	Puertomingalvo
26. No	Intraesparita-Grainstone intraclástico	Losa Amarilla y Roja	Nogueruelas
27. Tr	Caliza travertínica recristalizada-Sparstone	Travertino Teruel	Villalba baja
28. Crt	Biomícrita-Wackstone bioclástico	Crema Teruel	Tortajada
29. A	Biopelmícrita-Wackstone de bioclastos	Abanto Primera	Abanto
30. D	Sparstone	Abanto Comercial	Abanto
31. Bl1	Dolosparstone	Blancas Crema	Blancas
Bl2	Dolosparstone	Blancas Jaspe	Blancas
Bl3	Dolosparstone	Blancas Moka	Blancas

IV.2. Unidades Geológicas

IV.2.1. LA CORDILLERA PIRENAICA

El Pirineo es la unidad más septentrional y geográficamente se corresponde con la porción de la Cordillera Pirenaica que se extiende entre el Golfo de Rosas, en el Mediterráneo y el Golfo de Vizcaya, en el Océano Atlántico.

Los Pirineos abarcan el espacio comprendido entre el cabalgamiento frontal nor-pirenaico (CFNP) que pone en contacto los materiales pirenaicos con los materiales de la cuenca de Aquitania y el cabalgamiento frontal sur-pirenaico (CFSP) que los pone en contacto con los materiales de la cuenca del Ebro. El Pirineo queda a su vez dividido en dos ámbitos por una falla de primer orden heredada de tiempos tardihercínicos, la falla norpirenaica (FNP), la cual representa el contacto en superficie entre las placas Ibérica y Euroasiática. Esta falla supone un eje de asimetría, presentando las estructuras vergencia norte al norte de la misma y vergencia sur al sur de la misma.

En el Pirineo pueden distinguirse tres grupos litológico-estructurales. Al poseer unas características particulares, se comportan de manera desigual ante los distintos agentes externos y, por lo tanto, generan diferentes tipos de relieve:

- El zócalo: formado por los materiales más antiguos que se presentan intensamente deformados por la orogenia Hercínica.
- La cobertera: compuesta por materiales de edad Mesozoica y Terciaria afectados por la orogenia Alpina, que se encuentran discordantes sobre el zócalo.
- Materiales post-orogénicos: materiales Neógeno-Cuaternarios posteriores a la orogenia Alpina. Se distribuyen de forma discordante sobre el zócalo y la cobertera.

Estructuralmente, se ha dividido al Pirineo y sus cuencas de antepaís en varias zonas en sentido transversal, que son, de norte a sur, la Cuenca de Aquitania, Zona Norpirenaica, Zona Surpirenaica y Cuenca del Ebro. La Zona Surpirenaica se divide de norte a sur en Zona Axial, Sierras Interiores, Depresión Media y Sierras Exteriores.

Zona Norpirenaica

Abarca el espacio comprendido entre la falla Norpirenaica y la Cuenca de Aquitania. Todas las estructuras presentan vergencia norte y la serie mesozoica está deformada y parcialmente metamorfozada.

Zona Surpirenaica

Abarca el espacio comprendido entre la falla Norpirenaica y la Cuenca del Ebro, con una extensión notablemente superior a la de la Zona Norpirenaica. En esta zona las estructuras presentan vergencia sur y está compuesta por diferentes mantos de cabalgamientos. Esta zona desde el punto de vista geológico se puede dividir en:

A) Zona Axial

La Zona Axial no corresponde estrictamente a las zonas internas de un orógeno, sino a la parte más alta de la cadena, donde afloran las rocas paleozoicas. Debido al levantamiento provocado por la orogenia Alpina, en ella, prácticamente aflora sólo el zócalo Paleozoico, ya que la erosión ha eliminado la cobertera Mesozoica. Desde el punto de vista litológico, en esta unidad aparecen los materiales más antiguos del Pirineo, entre los que predominan, esquistos, pizarras y cuarcitas intercalados con potentes bancos de calizas cristalinas, mármoles e intrusiones graníticas.

B) Sierra Interiores

Se ubican al sur de la Zona Axial y adosadas a la misma, forman un eje alargado de crestas calcáreas que presentan una gran continuidad y notables relieves. Las edades de los materiales de esta unidad están comprendidas entre el Cretácico superior y el Paleógeno inferior, con ocasional ausencia de materiales del Jurásico y del Cretácico inferior. El Cretácico superior engloba a la formación Estrecho, constituida por calizas dolomíticas, y a la formación Marboré, constituida por areniscas y calizas arenosas. Al Paleógeno inferior, por su parte, le corresponden las calizas con alveolinas que se localizan prácticamente en todo el Pirineo aragonés.

C) Depresión Media

Ocupa el espacio comprendido entre las Sierras Interiores y las Sierras Exteriores. Los materiales que forman esta depresión son terciarios y, en general, blandos. Por ello es característica la ausencia de fuertes relieves. Desde el punto de vista geológico, se puede subdividir en 3 unidades:

- Unidad Flysch: al sur de las Sierras Interiores, es la unidad más septentrional de la Depresión Media. Posee una estructura de sinclinal asimétrico vergente al sur. Esta zona está ocupada por el Grupo de Hecho, rocas de edad Eocena (Terciario inferior) con una potencia de 3.500 a 4.500 m, entre las que predominan las turbiditas terrígenas con intercalaciones de megacapas calcáreas de numulites.
- Canal de Berdún: se extiende por las comarcas de Boltaña-Aínsa, valle de Fiscal y Roda de Isábena. En esta subunidad afloran las formaciones de margas de Argüís y de Arro, así como la arenisca de Sabiñánigo, todas ellas de edad Eocena. Estructuralmente, esta unidad describe un anticlinal vergente al sur.
- Sinclinorio del Guarga: ocupada por masas importantes de conglomerados, presenta los relieves más importantes. Aquí afloran rocas de la formación Campodarbe (conglomerados, areniscas y lutitas fluviales), formación Belsué-Atarés (areniscas en facies deltaias) y formación de margas de Pamplona, todas ellas eocenas.

D) Sierras Exteriores

Las Sierras Exteriores, con una estructura compleja, se extienden por el borde meridional del orógeno pirenaico y describen una alineación NW-SE. Las edades de los materiales que forman las Sierras Exteriores van desde el Triásico superior hasta el Terciario (Mioceno medio), existiendo una laguna estratigráfica que abarca desde el Jurásico hasta el Cretácico inferior. El Cretácico superior está representado por calizas con rudistas y el tránsito al Terciario viene marcado por arcillas y areniscas versicolores denominadas facies Garumnienses. Del Eoceno (Terciario inferior) es la formación Guara, calizas con numulites y alveolinas.

Las sierras Exteriores son la última unidad del Pirineo y suponen el límite con la Cuenca del Ebro. En el margen septentrional de esta cuenca, la sedimentación procede de la erosión de la cadena pirenaica y los materiales más antiguos son de edad Oligoceno-Mioceno.

IV.2.1.1. Canteras activas en la cordillera pirenaica

En el Pirineo se localizan cinco canteras de piedra natural (figura IV-3) ubicadas en las formaciones Terciarias de la Zona Surpirenaica (Formación Belsué-Atares, Formación Campodarbe, Formación Margas de Pamplona y Grupo Hecho) y más concretamente en la Depresión Media, que se extiende desde el Pirineo aragonés hasta el Pirineo navarro.

En el Pirineo además de estas canteras existen importantes afloramientos de calizas cristalinas, mármoles y granitos, pero en la actualidad ninguno de estos materiales es explotado debido a su intensa fracturación abierta, que dificulta la obtención de bloques de tamaño comercial y a que muchos de estos materiales se encuentran en zonas protegidas de alto valor medioambiental.

Los materiales explotados en las formaciones terciarias se originaron con el cambio en el régimen de esfuerzos que tuvo lugar a partir del Cretácico superior por la convergencia de las placas Africana, Ibérica y Europea, que se manifestó en el Pirineo con la génesis de cuencas de antepaís a partir del Eoceno inferior.

La sedimentación en la cuenca Surpirenaica de antepaís o Cuenca de Jaca durante el Eoceno inferior y medio fue predominantemente de materiales turbidíticos correspondientes al Grupo de Hecho. En estos materiales se ubican las explotaciones de las piedras de Fiscal (4-Hu) y de Pueyo de Araguás (5-Pa). Esta sedimentación turbidítica pasa gradualmente a las margas de talud (Margas de Arro-Fiscal) (Puigdefábregas, 1975) y finalmente a calizas de plataforma (Calizas de Guara) que se asientan sobre el margen continental del antepaís sur.

En el Eoceno medio y tras el relleno de la cuenca con los materiales turbidíticos, aparecen unas margas de plataforma-talud deltaico sobre las calizas del margen sur (Margas de Arguís-Pamplona, de edad Luteciense) en las que se explota la piedra de Yesa (1-Ye), que pasan progresivamente a sedimentos de frente deltaico (Fm Belsué-Atarés) en los que se explota la piedra de Martes (2-Ma), provenientes también del sur y del este, y a depósitos de origen continental (sedimentos fluviales de la Fm Campodarbe) en los que se ubica la piedra de Ena (3-En). Todo el sistema fluvio-deltaico que constituyen las formaciones de Arguís-Pamplona, Belsué-Atarés y Campodarbe progreda hacia el W-NW según el eje de la cuenca. Sin embargo, el relleno molásico incluye materiales de origen aluvial proximal en varios abanicos de procedencia norte.

■ FIGURA IV.3

Mapa geológico de la Cordillera Pirenaica con la ubicación de las explotaciones (modificado de Teixell, 1996)



IV.2.2. DEPRESIÓN CENTRAL O DEPRESIÓN TERCIARIA DEL EBRO

La Depresión Terciaria del Ebro constituye una extensa zona peninsular morfológicamente deprimida y drenada en gran parte por el río Ebro. Posee una forma sensiblemente triangular y está limitada por tres alineaciones montañosas: Pirineos al norte, Cordillera Ibérica al suroeste y Cordillera Costero Catalana al este (Riba *et al.*, 1983) que originan una depresión tectónica que va siendo colmatada, a lo largo del Terciario superior, por los derrubios procedentes de la erosión de las cadenas montañosas marginales.

A finales del Cretácico, la colisión de las placas Europea e Ibérica causó el levantamiento del basamento de los márgenes pirenaicos e ibéricos y generó pliegues que configuraron las tres cordilleras que sirven de límite a la cuenca. La Depresión Terciaria del Ebro se forma a mediados del Terciario como consecuencia de la orogenia Alpina y representa la última etapa en la evolución de la cuenca de antepais Surpirenaica que terminó de configurarse durante el Oligoceno superior-Mioceno inferior debido al emplazamiento de la lámina del Guarga (Cámara y Klimowitz, 1985), pasando la anterior cuenca de antepais (Cuenca de Jaca) a cuenca de piggyback erosiva. Esta orogenia supuso un cambio en la dirección de los aportes con respecto a las unidades fluviales infrayacentes, pasando los aportes a proceder del norte, teniendo como áreas fuente: el Pirineo Axial, Sierras Interiores, Cuenca de Jaca y Sierras Exteriores. La evolución paleogeográfica de la cuenca del Ebro estuvo determinada por la actividad tectónica que configuró las cadenas circundantes (Pardo *et al.*, 2004).

La depresión central se caracteriza por no presentar importantes estructuras tectónicas ni importantes desniveles. Se extiende sobre terrenos Miocenos post-alpinos, por ello las deformaciones son escasas y los buzamientos nunca superan los 10°, a excepción de los escarpes de las muelas. Los depósitos Neógenos aparecen suavemente basculados como consecuencia de deformaciones distensivas.

El relleno de esta depresión no fue isócrono, sino que inicialmente durante el Eoceno comenzó en la parte oriental, trasladándose progresivamente al resto de la cuenca siendo ya generalizado en el Oligoceno-Mioceno. En el Paleógeno la sedimentación es marina al norte y al este y continental al sur. En el Oligoceno la depresión no estaba ocupada por el mar, por lo que se convirtió en una gran depresión cerrada con régimen endorreico.

Durante el Oligoceno y buena parte del Mioceno, los bordes de la cuenca estuvieron ocupados por abanicos aluviales que transportaban agua y sedimentos detríticos procedentes del desmantelamiento del Pirineo y del Sistema Ibérico; en tanto que en la zona central se generaron lagunas someras donde se depositaron calizas y margas en los periodos húmedos, y yesos y sales en los áridos. El resultado de la sedimentación no fue la colmatación de la cuenca, sino el hundimiento del zócalo de la depresión debido a subsidencia.

En el Mioceno medio y como consecuencia de eventos tectónicos tardíos, se produce la apertura al Mediterráneo de la Depresión del Ebro, es decir, pasamos de una situación endorreica a otra exorreica, lo que desencadenó el establecimiento de la actual red fluvial. La instalación del Ebro y de su red de afluentes implica una continua erosión que dio lugar a la sobreexcavación de los sedimentos terciarios y una progresiva jerarquización de la red fluvial. Esta intensa erosión tras la apertura provocó un vaciado parcial de la cubeta.

Los materiales que rellenan la cuenca del Ebro se han agrupado en 8 unidades tectosedimentarias (UTSs) (Pardo *et al.*, 2004), que han sido correlacionadas en los diferentes sectores por criterios cartográficos y paleontológicos.

Los materiales que aparecen en la Depresión del Ebro son: conglomerados, areniscas, arcillas, margas, yesos y calizas, con una estructura horizontal o monoclin. En las zonas marginales predominan los materiales Terciarios en facies continentales; conglomerados Oligocenos y Miocenos (adosados a los frentes montañosos del Pirineo y de la Ibérica), que evolucionaron hacia el interior de la cuenca a materiales progresivamente más finos, así, se pasa de los detríticos gruesos (conglomerados) a los detríticos de grano medio (areniscas) y, finalmente, a los detríticos de grano fino en la parte central (lutitas, arcillas y materiales evaporíticos).

IV.2.2.1. Canteras activas en la Depresión Terciaria del Ebro

En la depresión Terciaria del Ebro se localizan cinco explotaciones de piedra natural (figura IV-4), tres de areniscas y dos de calizas campanil, todas ellas comercializadas como piedras de cantería.

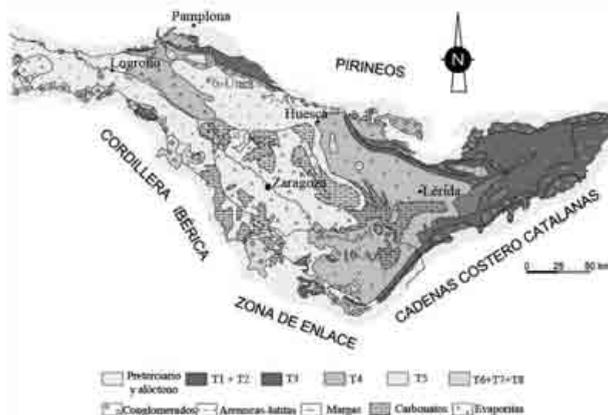
Las areniscas miocenas de Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az) se localizan en el borde exterior del sector central de la depresión Terciaria del Ebro. Desde el punto de vista geológico las tres areniscas pertenecen a facies detríticas del Terciario medio-superior de la cuenca del Ebro, siendo interpretadas como sedimentos fluviales de sistemas aluviales con regímenes variados pero predominantemente meandriformes que gradan hacia sistemas lacustres; este sistema es de doble vergencia ya que los cursos del flanco norte fluyen hacia el sur mientras que los del flanco suroeste lo hacen hacia el norte y noreste estando la zona central de la depresión ocupada por facies evaporíticas. Las areniscas de Uncastillo y de Ayerbe pertenecen a la formación Uncastillo mientras que la arenisca de Alcañiz se ubica en la formación Caspe.

Los niveles explotados no son exclusivos de este sector, ya que orlan todo el borde exterior de la depresión. Geográficamente, las canteras se distribuyen en dos franjas (Mateos, 2004).

- La Septentrional, que englobaría los afloramientos de la alineación Tafalla, Uncastillo, Huesca, Sigüera, Barbastro, Monzón, Fraga y Lérida.
- La Suroccidental, que abarcaría la región delimitada por las localidades de Tarazona, Azuara, Escatrón, Caspe, Fabara y Alcañiz.

■ FIGURA IV.4

Mapa geológico de la Depresión Central con la ubicación de las explotaciones (modificado de Alonso-Zarza *et al.*, 2002)



Las calizas campaniles se localizan en las zonas más centrales de esta gran depresión y se depositaron en ambientes de tipo lacustre somero. Conformaron extensas plataformas calcáreas horizontales, y actualmente son extensos cerros testigos de la sedimentación terciaria, denominados muelas o planas. Representan la culminación de los depósitos neógenos, correspondiendo a la parte final del relleno de la depresión. Las explotaciones caracterizadas se localizan en Tudela (8-Tu) y Fraga (9-Fr).

IV.2.3. LA CORDILLERA IBÉRICA

La Cordillera Ibérica es una cadena intracratónica situada entre los dos orógenos alpinos de la Península Ibérica: la cadena Pirenaica y las cadenas Béticas. Se ubica en el sector centro-oriental de la Península Ibérica, extendiéndose a lo largo de unos 400 Km desde la Meseta Ibérica hasta el Mar Mediterráneo, quedando limitada al norte por la Depresión Terciaria del Ebro y por las Catalánides, al este por la costa mediterránea, al oeste por las cuencas Terciarias del Duero y del Tajo y al sur por el Prebético.

La Ibérica es una cordillera con doble vergencia, caracterizada por un magmatismo muy escaso y por la ausencia de metamorfismo contemporáneo con el plegamiento. Se encuentra cabalgando sobre la depresión central mediante unas fracturas inversas que poseen una gran continuidad y facilitan el movimiento hacia el norte. En esta cordillera se pueden diferenciar dos pisos estructurales superpuestos, por un lado el zócalo individualizado por las estructuras Hercínicas y formado por los materiales Paleozoicos y la cobertera que engloba al Jurásico, Cretácico y Terciario.

En la génesis de esta cordillera han estado implicados dos ciclos orogénicos sucesivos, el ciclo Hercínico que estructuró el zócalo y el ciclo Alpino que afectó tanto al zócalo como a la cobertera mesozoico-terciaria. El ciclo Alpino se originó como consecuencia del movimiento hacia el norte de la placa Africana que supuso el choque de Iberia con Europa. Esta colisión provocó una inversión tectónica positiva, es decir, se pasó de un régimen extensional a un régimen compresional, reactivándose como fallas inversas las estructuras extensionales existentes. Esta colisión desencadenó el levantamiento y replegamiento de los materiales que se habían acumulado. La estructura de la cadena es consecuencia de la superposición de estas dos fases tectónicas.

Las principales estructuras de la Cordillera Ibérica presentan una alineación NW-SE, aunque localmente pueden aparecer zonas con alineaciones de sus estructuras E-W y NE-SW.

La Cordillera Ibérica puede ser dividida en dos ramas: la rama Occidental o rama Castellana y la rama Oriental o rama Aragonesa estando ambas separadas por la depresión Terciaria de Calatayud-Daroca-Teruel, que se trata de una fosa tectónica que ha sido colmatada por sedimentos miocenos postorogénicos. Esta cordillera se bifurca hacia el SE en esas dos ramas, las cuales discurren paralelas durante cientos de Km.

- La Rama Castellana o Rama Occidental: Se localiza al sur de la depresión y engloba entre otras sierras a la Sierra de Albarracín, Sierra de Altomira y Serranía de Cuenca. Presenta los relieves más abruptos y en ella se sitúan las únicas huellas del glaciario cuaternario Ibérico.
- La Rama Aragonesa o Rama Oriental: Se ubica al norte de la depresión y esta compuesta por los macizos paleozoicos de Sierra de la Demanda, Ateca-Daroca y Calatayud-Montalbán todos ellos de dirección noroeste-sureste. En Teruel, el sector del Maestrazgo se conforma como una subunidad con entidad propia.
- Depresión de Calatayud-Daroca-Teruel: Se extiende entre la rama Aragonesa y la rama Castellana de la Cordillera Ibérica, presentando una evolución geológica ligada a la de la

primera. Esta depresión o fosa tectónica alargada según un eje de dirección NW-SE, se generó durante el Terciario como consecuencia de fases orogénicas que fragmentaron el zócalo paleozoico.

Litológicamente la Ibérica posee un registro bastante completo, abarcando desde los afloramientos más antiguos de Aragón, que se localizan en la cuenca del río Jalón en la región de Paracuellos de la Ribera de edad precámbrica, hasta los sedimentos actuales, aunque dominan los materiales mesozoicos y terciarios.

Las series paleozoicas son muy completas y comprenden todos los periodos. Estos materiales se depositaron en cuencas marinas de profundidad variable y aparecen plegados y fracturados como consecuencia de los esfuerzos compresivos de la orogenia Hercínica.

En el tránsito entre el Paleozoico y el Mesozoico tuvo lugar un cambio en el régimen de los esfuerzos pasando de compresivos a distensivos. Estos esfuerzos distensivos crearon una serie de fosas o cuencas sedimentarias en las que se depositaron materiales de origen tanto marino como continental.

En el tránsito entre el Mesozoico y el Cenozoico hubo una nueva inversión en el régimen de esfuerzos, permaneciendo este régimen compresivo hasta el final del Terciario. En este periodo de tiempo se crearon una serie de cuencas en el interior de la cordillera Ibérica que fueron rellenadas con materiales continentales.

A partir del Terciario en el límite oriental de la cordillera se paso a un régimen distensivo que dio lugar a las fosas tectónicas por donde hoy discurren los ríos Jiloca, Alfambra y Turia.

IV.2.3.1. Canteras activas en la cordillera Ibérica

En la Cordillera Ibérica se han caracterizado 23 explotaciones (figura IV-5) de piedra natural en las que se explotan 30 variedades pétreas. Estas explotaciones se encuentran repartidas a lo largo de toda su extensión quedando especialmente concentradas en la zona del Maestrazgo. En la Cordillera Ibérica se explota piedra natural con diferentes usos: ornamental, cantería y losas.

Los materiales más antiguos explotados en la Cordillera Ibérica son de edad triásica y pertenecen a la facies Buntsandstein depositada bajo condiciones de clima árido en cuencas continentales. Se explotan en el Moncayo en los tramos superiores, localizándose los mismos niveles explotados en otros puntos de la Ibérica en los que sería posible establecer explotaciones de este material.

En el Jurásico se suceden tres ciclos de ascenso y caída del nivel del mar que se corresponden con las etapas en las que se divide el Jurásico (Lías, Dogger y Malm, o Inferior, Medio y Superior). Durante el Jurásico Inferior, tras la última etapa de sedimentación marina del Triásico (formación Imón), se originó una plataforma marina con sus dominios más profundos abiertos hacia el Atlántico. Durante el Jurásico Medio, la plataforma de carbonatos que cubría el sur de Aragón dejó un depósito de calizas de litología y espesores muy variables, que se agrupan, de forma genérica, en la denominada formación Chelva. Las explotaciones localizadas en esta formación tienen carácter local (en la área de Calatorao esta formación tiene una litología particular que le hace especialmente apta para usos constructivos). En el inicio del Jurásico Superior se instala una extensa plataforma, que tenía una doble polaridad (Mediterránea y Atlántica). Posteriormente, el levantamiento de la Meseta implica la progresiva retirada del mar que culmina con la total emersión de la zona central de la cuenca de sedimentación al final del Jurásico. Los materiales del último vestigio de la sedimentación marina Jurásica en la región se agrupan en la formación Higuieruelas. Esta formación tiene una gran extensión a lo largo de toda la Cordi-

llera Ibérica, pero presenta en el entorno de la Puebla de Albornón una litología particular, fruto de una rubefacción de edad miocena, en la que se ubica la explotación, que no se observa más que de manera local dentro de esta formación.

En el Cretácico inferior tienen lugar varios ciclos sedimentarios en la Cordillera Ibérica. Los materiales del Barremiense (en los que se encuadra la formación Alacón) indican un máximo en la trasgresión marina, comenzando el Aptiense con un episodio regresivo. En el Beduliense tiene lugar otro episodio transgresivo (formación Chert). Entre el Aptiense superior y el Albiense tiene lugar una paulatina elevación de la cuenca con el depósito de margas y calizas detríticas arenosas entre las que se encuentra la formación Capas Ocreas de Benasal, hasta pasar a los sedimentos claramente regresivos de la formación Utrillas. En el Albiense superior-Cenomaniense se vuelve a una sedimentación marina. En el Cretácico superior tiene lugar una trasgresión marina que invade gran parte del ámbito sedimentario de la Ibérica.

El Cretácico superior en el Maestrazgo es esencialmente carbonatado y abarca desde el Albiense superior hasta el Daniense (formación Mosqueruela, formación Órganos de Montoro y formación Barranco de los degollados). Los materiales de estas formaciones pueden ser explotados en todo el Maestrazgo si presentan una disposición favorable para ello. Finalmente a partir del Campaniense tiene lugar la emersión definitiva de la cuenca.

En el Terciario superior se localizan pequeñas explotaciones de carácter local de calizas lacustres y carbonatos de tipo travertínico formados en ambos casos en medios continentales.

En la rama Castellana destacan las explotaciones de roca ornamental de Blancas (31-BI) situada en la formación Dolomías del Barranco de los Degollados y de calizas y dolomías en Abanto (29-A, 30-D) pertenecientes a la formación Embalse de La Tranquera, ambas de edad Cretácico superior y de carácter local.

En la Depresión de Calatayud-Daroca-Teruel se explotan la caliza del Páramo de Tortajada (28-Crt) y el travertino terciario de Villalba Baja (27-Tr).

En el sector septentrional de la rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica afloran rocas de todas las edades y de casi todas las composiciones. Los materiales explotados son lajas de areniscas rojas del Moncayo (11-Ta) en Facies Bundsandstein y las calizas ornamentales de Calatorao (12-Ca) formación Chelva y de la Puebla de Albornón (13-Pu) formación Higuieruelas, ambas de edad Jurásica. En el Maestrazgo de la rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica se localiza el mayor número de las explotaciones, siendo todas ellas de edad Cretácica menos el travertino del Terciario continental de Villaluengo (18-VI-II). Los materiales cretácicos tableados del Maestrazgo se explotan principalmente como lajas y en menor medida como piedras de cantería y ornamentales.

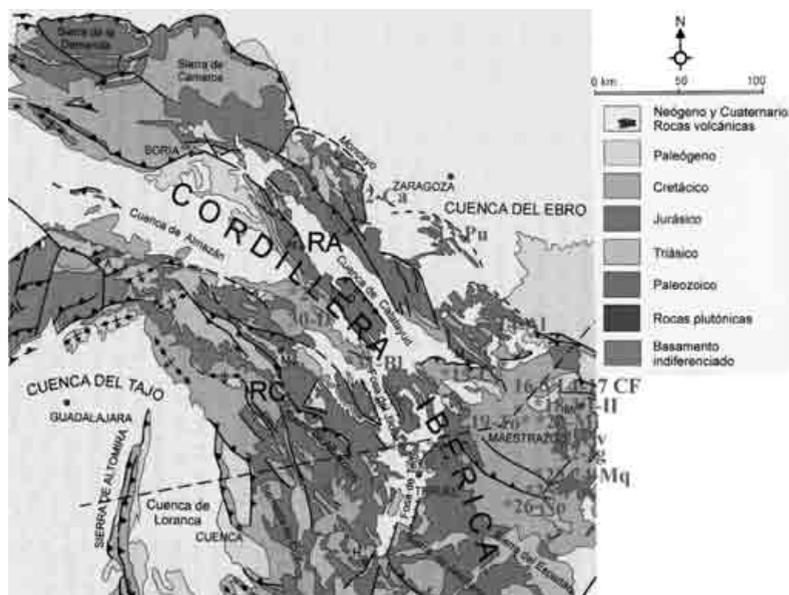
En el Cretácico inferior de este sector de la Ibérica se localiza numerosas explotaciones de lajas:

- Alacón (14-Al): formación Alacón, edad Barremiense-Aptiense.
- Nogueruelas (26-No), Iglesuela (22-Ig) y Cantavieja (21-Cv): formación Calizas Ocreas de Benasal, edad Albiense Inferior.
- Mirambel (20-Mi): formación Calizas y Margas de Chert, edad Bedouliense.
- Mosqueruela (23-Mq, 24-Mq), Puertomingalvo (25-Pm), Cuevas (15-Ce) y Villaluengo (19-To): formación Mosqueruela, edad Albiense-Cenomaniense.

El Cretácico superior, a diferencia del Cretácico inferior, es masivo y en él se localizan las explotaciones de calizas ornamentales de Villaluengo (16-VI-I y 17-CF) pertenecientes a la formación Órganos de Montoro.

■ FIGURA IV.5

Mapa geológico de la Cordillera Ibérica con la ubicación de las explotaciones (modificado de Vera *et al.*, 2004). RA (Rama Aragonesa), RC (Rama Castellana)



V.3. Fichas de situación geográfica y geológica

Se han elaborado una serie de fichas de situación geográfica y geológica para las variedades pétreas caracterizadas, creando una ficha para cada una de las formaciones geológicas en las que se localizan las explotaciones caracterizadas. Estas fichas se dividen en tres apartados: información general, situación geográfica y situación geológica y características de las explotaciones.

a) Información general

En esta primera parte de la ficha se incluye el número y la sigla de cada variedad, nombre científico, formación a la que pertenece y edad geológica.

b) Situación geográfica

En este apartado se indica el término municipal en el que se ubica la explotación, la hoja del mapa geológico 1:50.000 en el que se encuadra, sus coordenadas de referencia y la empresa que explota el material.

c) Situación geológica y características de la explotación

En este apartado se describe de forma genérica la formación en la que se encuadran los materiales, así como las principales características de los niveles explotados y del método de explotación. Este apartado se completa con fotografías de campo en las que se muestran los frentes de explotación y las características más relevantes de las explotaciones.

En la tabla IV-3 se presenta una escala de tiempo geológico con la ordenación temporal de los materiales explotados. Las siglas se corresponden con las descritas en las tablas IV-1 y IV-2.

TABLA IV.3

Tabla de tiempo geológico con la ordenación temporal de los materiales caracterizados

Eón	Era	Periodo	Época	Piso
FANEROZOICO	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Versiliense
			Pleistoceno	Calabriense
		Neógeno	Plioceno	Placenziense
				Zanclayense
			Mioceno	Messiniense → 18 VI-II, 27 Tr 28 Crt
				Tortoniense
				Serravalliense
				Langhiniense
				Burdigaliense → 9 Fr, 6 Un, 7 Ay
				Aquitaniense → 10 Az, 8 Tu
		Paleógeno	Oligoceno	Chattiense
				Rupeliense
			Eoceno	Priaboniense → 1 Ye
				Bartoniense → 3 En 2 Ma
				Luteciense
			Ypresiense → 4 Hu, 5 Pa	
	Paleoceno		Thanetiense	
			Daniense	
	Cretácico		Superior	Maastrichtiense
				Campanéense
		Santoniense		
		Coniacense → 29 A, 30 D, 31 B1		
		Turonense		
		Inferior	Cenomaniense → 16 VI-I, 17 CF	
			Albiense → 15 Ce, 19 To, 23 Mq-1, 24 Mq-2, 25 Pm	
			Aptiense → 21 Cv, 22 Ig, 26 No	
			Barremiense → 20 Mi	
			Barremiense → 14 A1	
			Hauteribiense	
			Valanginiense	
Berriasiense				
Jurásico			Superior	Titónico → 13 Pu
				Kimmeridgiense
	Oxfordiense			
	Medio	Calloviense		
		Dogger	Bathonense → 12 Ca	
		Bajociense		
		Aaleniense		
	Inferior	Lias	Toarciense	
			Pliensbachiense	
			Sinemuriense	
	Hettangiense			
Triásico	Superior	Noriense		
		Carniense		
	Medio	Ladiniense		
		Anisiense		
Inferior	Scytiense → 11 Ta			

Sigla: 1-Ye

Nombre científico: Sedarenita

Edad: Eoceno (Priaboniense)

Formación: Margas de Pamplona

Situación geográfica

La cantera de la Piedra de Yesa se localiza en el término municipal de Yesa (Navarra), en el Prepireno navarro, al NE de Navarra, lindando con el Prepirineo aragonés, en la cuenca del río Aragón. Hoja del mapa geológico nacional 175 Sigües escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 11' 00"

Latitud Norte 42° 37' 11"

X 646.585 Y 4831.298 Z 520

Empresa: Olnasa, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La piedra de Yesa es de edad Priaboniense y pertenece al "Flysch" de Yesa, que corresponde a niveles turbidíticos (canales en forma de cuerpos aislados e irregulares de talud formando lentejones de arenisca) en las facies marinas profundas de las margas de Pamplona (Puigdefábregas 1975). Las margas de Pamplona presentan una potencia de 400-1000 metros.

La explotación coincidió temporalmente, con la construcción de varias urbanizaciones en la margen derecha del río Aragón a la altura de la cerrada del pantano, y ceso al finalizar las obras asociadas. Se explotaron estratos de areniscas de 0,4 a 1,8 metros de potencia intercalados con niveles margosos de espesor semejante y buzando 35°-45° hacia el E.



Figura A. Vista general de la zona explotada

Figura A'. Niveles explotados de la formación Margas de Pamplona

Sigla: 2-Ma

Nombre Científico: Sedarenita

Edad: Eoceno (Bartoniense)

Formación: Belsué-Atarés

Situación geográfica

La cantera de la piedra de Martes se localiza en el término municipal de Martes (Huesca), en el Prepireno Aragonés, en la parte E de la hoja del mapa geológico nacional 175 Sigües escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 53' 50"

Latitud Norte 42° 34' 30"

X 672.581 Y 4715.848 Z 680

Empresa: Olnasa, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La piedra de Martes se explota en los tramos basales de la formación Belsué-Atarés. Esta es una formación deltaica, constituida por una alternancia de areniscas y margas gris azuladas de hasta 650 metros, organizadas en secuencias granocrecientes que lateralmente pasan a las Margas de Pamplona.

La cantera de Martes se localiza en la zona de contacto de la formación Belsué-Atarés con la formación Margas de Pamplona. Se explotan bancos de 1 hasta 3 metros de espesor, apoyados unos sobre otros sin intercalaciones lutíticas y buzando 30°-40 ° al S.

La inclinación de los estratos a favor de la pendiente de la cantera permite una explotación que no requiere grandes desmontes de material, lo que reduce el impacto medioambiental y visual de la cantera. La perforación se realiza por medio de banquedora y la extracción de los bloques con retroexcavadora.



Figura A. Niveles explotados (1-3 m de potencia) en la formación Belsué-Atarés

Figura A'. Vista general de la zona explotada

Sigla: 3-En

Nombre Científico: Sedarenita

Edad: Eoceno (Biarritzense)

Formación: Campodarbe

Situación geográfica

La Piedra de Ena se explota en la cantera "La Carina" ubicada en el término municipal de Ena (Huesca), en la parte central de la hoja del mapa geológico nacional 209 Agüero escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 42' 10"

Latitud Norte 42° 26' 59"

X 688.918 Y 4702.351 Z 670

Empresa: Loseta, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

Los materiales explotados pertenecen a la formación Campodarbe del Eoceno superior (Biarritzense). Es una formación terciaria continental, de tipo fluvial, que forma parte de una unidad de orden superior, el sinclínico del Guarga. Esta constituida por una alternancia de areniscas y lutitas fluviales.

Dentro de la formación Campodarbe, esta cantera corresponde a las facies de Ipiés y Cáseda. Esta unidad presenta una gran extensión, así como una importante variación de facies en su interior. En ella alternan lutitas con areniscas dispuestas en capas de escasa superficie, con una relación de clasticidad baja. Las areniscas poseen estructuras de todo tipo: laminaciones paralelas, cruzadas a varias escalas, etc.

Los niveles explotados tienen espesores de 0,5 a 3 metros y un buzamiento de 30°, con una continuidad lateral variable y distintos tipos de estructuras en paleocanales. Se explotan preferentemente los niveles con laminación paralela que, por meteorización, son lajosos en los 2 metros superficiales. Los colores en fresco son grises y evolucionan a marrones por oxidación superficial.



Figura A. Vista general de la explotación de la arenisca de Ena

Figura A'. Detalle de un estrato de arenisca de 0,5 metros de potencia

Sigla: 4-Hu**Sigla:** 5-Pa**Edad:** Eoceno (Cuisiense-Luteciense)**Nombre Científico:** Sedarenita**Nombre Científico:** Filarenita**Formación:** Grupo de Hecho

Situación geográfica

La Piedra del Alto Aragón (4-Hu) se explota en la cantera "Los Esquiñoles II" ubicada en el término municipal de Fiscal (Huesca), en la parte NW de la hoja del mapa geológico nacional 211 Boltaña escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 07' 10".

Latitud Norte 42° 30' 04"

X 736.699 Y 4709.522 Z 920

Empresa: Piedra del Alto Aragón, S.A.

La Piedra de Pueyo (5-Pa) se explota en la cantera "Torrelisca" ubicada en el término municipal de Pueyo de Araguas (Huesca), en la parte N de la hoja del mapa geológico nacional 211 Boltaña escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 10' 14".

Latitud Norte 42° 27' 35"

X 732.652 Y 4704.784 Z 880

Empresa: Ayuntamiento de Pueyo de Araguás

Situación geológica y características de la explotación

El Grupo Hecho se generó como consecuencia de los movimientos tectónicos ocurridos al iniciarse el Eoceno, que preconfiguraron la cuenca "flysch", surco subsidente alargado según la dirección pirenaica que fue rellenado por terrígenos depositados por corrientes de turbidez (Puigdefábregas, 1975). Dentro de esta cuenca las facies fluviales y deltaicas se localizan al E en la zona del Ésera, mientras que hacia el W (zona de Broto) se localizan las facies Flysch (sedimentos turbidíticos profundos: Grupo de Hecho).

Bajo el nombre de Grupo Hecho se aglutina un tipo de secuencia sedimentaria en la que alternan, de una manera bastante uniforme, materiales duros (areniscas con variedades más silíceas y más calcáreas) con materiales blandos (arcillas y margas). Se localiza al S de las Sierras Interiores, en contacto con las calizas de alveolinas por medio de una discordancia angular. Su potencia estimada es de 3.500-4.500 metros al N, con una importante disminución de potencia hacia el S y un paso lateral hacia margas confirmado por la cartografía de unos niveles guías, las barras calcáreas, unos megarritmos generados por las corrientes de turbidez en las que se pueden diferenciar tres términos: el término superior lutítico (margas) entre 10 y 30 metros, el término medio de areniscas calcáreas gradadas de 5 a 50 metros (tramo en el que se encuentran las explotaciones) y Slump basal de 10 a 80 metros.

La piedra del alto Aragón (4-Hu) es explotada en bancos de hasta 1 metro de espesor y buzamiento muy suave (10°) hacia el S, entre los que se intercalan niveles de granulometría fina (lutitas). El diaclasado tiene un espaciado métrico, originando bloques de hasta 5 metros de lado.

La piedra del Pueyo de Araguás (5-Pa) se explota en estratos de gran continuidad lateral de hasta 0,8 metros de potencia y que aparecen intercalados con capas margosas. En todos los casos son bancos gris/azulados con ribetes marrones en las fisuras por oxidación superficial. El diaclasado tiene un espaciado de 1 a 3 metros.



Figura A. Cantera de la explotación de la Piedra del Alto Aragón, S.A

Figura A'. Intercalaciones de materiales duros (bancos de areniscas de hasta 1 metro de potencia en los bancos inferiores) con materiales blandos (arcillas y margas)



Figura B. Aspecto general de la cantera de arenisca de Pueyo de Araguás

Figura B'. Aspecto de un banco de arenisca de 0,7 metros de potencia en la explotación "Torrelisca".

Sigla: 6-Un

Nombre Científico: Calclitita

Sigla: 7-Ay

Nombre Científico: Calclitita

Edad: Mioceno (Aquitaniense-Burdigaliense)

Formación: Uncastillo

Situación geográfica

La Piedra de Uncastillo (6-Un) se explota en la cantera "Martínez" ubicada en el término municipal de Uncastillo (Zaragoza), en la parte SW de la hoja del mapa geológico nacional 208 Uncastillo escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 09' 10".

Latitud Norte 42° 21' 04"

X 657.326 Y 4579.521 Z 760

Empresa: Olnasa, S.L.

La Piedra de Ayerbe (7-Ay) se explota en la cantera "San Julián" ubicada en el término municipal de Ayerbe (Zaragoza), en la parte central de la hoja del mapa geológico nacional 247 Ayerbe escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 43' 10"

Latitud Norte 42° 17' 04"

X 688.040 Y 4683.960 Z 480

Propietario: Francisco Claver.

Situación geológica y características de la explotación

Las areniscas de Uncastillo y Ayerbe pertenecen a la formación Uncastillo, de edad: Mioceno inferior (Aquitaniense-Burdigaliense), (Puigdefábregas, 1975) equivalente de la formación Sariñena (Quirantes, 1978), que se encuadra en el norte de la Depresión del Ebro y en contacto con las Sierras Exteriores. Esta constituida por una alternancia de arcillas y areniscas que se presentan en forma de cordones sinuosos aislados y ocasionalmente en forma de placas.

La formación Uncastillo se ha dividido en tres unidades (Arenas, 1993) cuyos límites se han podido correlacionar con episodios de levantamiento del área fuente (Arenas *et al.*, 2001). La zona canterable de la formación Uncastillo pertenece a la unidad tectosedimentaria U2 (Arenas, 1993) mientras que la zona canterable de Ayerbe corresponde a la unidad tectosedimentaria U3. Las areniscas se disponen en forma de cordones sinuosos con un buzamiento subhorizontal, generando resaltes sobre las llanuras de lutitas menos resistentes (Puigdefábregas, 1975).

Tanto en Ayerbe como en Uncastillo se pueden distinguir tres tipos de cuerpos arenosos interestratificados con materiales lutíticos.

- Estratos arenosos de espesor inferior a 0,7 metros que, junto a las lutitas asociadas corresponden a las facies de llanura de inundación.
- Cuerpos arenosos de 0,8 a 3 m y una continuidad lateral de 40 a 80 metros. Representan depósitos de canales de ríos meandriformes. En estos cuerpos se encuentra el grueso de las explotaciones de rocas de usos constructivos.
- Capas arenosas de 3 a 8 m. de espesor. Representan superposiciones de sedimentos de canal sin intercalaciones lutíticas.

En los tres casos podemos encontrar facies de grano grueso, medio y fino. No obstante en las facies de llanura de inundación (a) abundan más las de grano fino que en los otros dos casos.

La arenisca de Uncastillo se explota a partir de estratos subhorizontales lenticulares de hasta 3 metros de potencia y con continuidad lateral de 50 a 90 metros. Existe gran variabilidad en cuanto al tamaño de grano, siendo la de tamaño medio la más trabajada. Las principales discontinuidades existentes son diaclasas con 1,5-3 metros de espaciado y la presencia de niveles arcillosos intercalados de origen fluvial. La perforación se realiza por medio de banqueadoras o taladradoras y los bloques se separan mediante cuñas manuales y cemento expansivo. Los bloques extraídos son de 2,5 x 1,7 x 1,8 metros.

La arenisca de Ayerbe se explota a partir de niveles tabulares y lenticulares subhorizontales de continuidad lateral variable que presentan una potencia comprendida entre los 35 cm y 5,5 metros. Estos paquetes de areniscas se encuentran intercalados con potentes paquetes de arcillas y limos. El diaclasado presenta un espaciado de 1-2 metros. La maquinaria de cantera es escasa, únicamente cuentan con un banqueador. Las areniscas se presentan en capas subhorizontales y se caracterizan por presentar una gran variabilidad en el tamaño de grano y presentar cantos predominantemente silíceos y calcáreos.



Figura A. Aspecto general de la cantera de la arenisca de Uncastillo

Figura A'. Extracción de bloques de la arenisca de Uncastillo con banqueadora



Figura B. Aspecto general de la cantera de la arenisca de Ayerbe

Figura B'. Extracción de bloques de la arenisca de Ayerbe con banqueadora

Sigla: 8-Tu

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Edad: Mioceno (Aquitaniense)

Formación: Tudela

Situación geográfica

La caliza Campanil de Tudela se explota en la cantera "Cabanillas-1" ubicada en el término municipal de Cabanillas (Tudela), en la parte SW de la hoja del mapa geológico nacional 283 Fustiñana escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 31' 10"

Latitud Norte 42° 02' 50"

X 622.532 Y 4656.162 Z 310

Empresa: Construcciones Zubillaga, S.A.

Situación geológica y Características de la explotación

La formación Tudela es una formación terciaria de origen continental compuesta de materiales aluviales distales y lacustres carbonatados. Es una formación dominada por las arcillas y margas de tonos ocre y grises con niveles de calizas algales con caráceas. Las capas de calizas, que son menos importantes en la base de la unidad, se van haciendo más potentes y más densas hacia techo. La potencia de estos estratos calcáreos varía entre 10 y 50 cm, pudiendo superar los 2 m. La asociación de facies de esta formación corresponde al desarrollo de un sistema lacustre-palustre carbonatado (caráceas y ostrácodos) poco estable y de carácter posiblemente efímero, como pone de manifiesto el escaso espesor de los niveles carbonatados.

El sistema de explotación es el banco único. Se explotan calizas lacustres tableadas en estratos subhorizontales de potencia comprendida entre 0,2 m y 1 m intercaladas con niveles de margas grises. El material es muy dúctil y prácticamente carece de fisuras. El frente de explotación presenta una altura media de 2 metros. La piedra es arrancada en bloques mediante el empleo de retroexcavadora.



Figura A. Aspecto general de la explotación de la caliza campanil de Tudela. Frente de cantera 2 metros
Figura A'. Aspecto de un bloque de de caliza campanil

Sigla: 9-Fr

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Edad: Mioceno (Aquitaniense-Turoliense)

Formación: Unidad Torrente del Cinca-Alcolea del Pinar

Situación geográfica

La caliza Campanil de Fraga se explota en la cantera "La Punta" ubicada en el término municipal de Fraga (Huesca), en la parte SW de la hoja del mapa geológico nacional 387 Fraga escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Este 0° 17' 2"

Latitud Norte 41° 30' 29"

X 273.313 Y 4598.801 Z 300

Empresa: Asfaltos Lorente.

Situación geológica y Características de la explotación

Los materiales explotados se localizan en el sector centro-oriental de la cuenca del Ebro, pertenecientes a la formación calizas y calizas arenosas con sílex Unidad Torrente del Cinca-Alcolea del Pinar (Agutí *et al.*, 1988).

Esta unidad presenta una potencia que oscila entre 20 y 60 metros, está formada por calizas bioclásticas frecuentemente arenosas y en ocasiones margosas, de tonos amarillentos con fragmentos de gasterópodos, ostrácodos, moluscos y caráceas. Se interpretan como depósitos carbonáticos correspondientes a ambientes lacustres y/o palustres de salinidad normal. Es característica la existencia de nódulos de sílex en la parte superior de la unidad.

Se explotan calizas tableadas en estratos subhorizontales de potencias comprendida entre 0,5 m y 1,5 m intercaladas con niveles de margas grises y localmente con niveles de lignito, que en ocasiones contienen abundantes restos orgánicos. El material es muy dúctil y prácticamente carece de fisuras. Los frentes de explotación presentan importantes variaciones en la densidad del diaclasado.

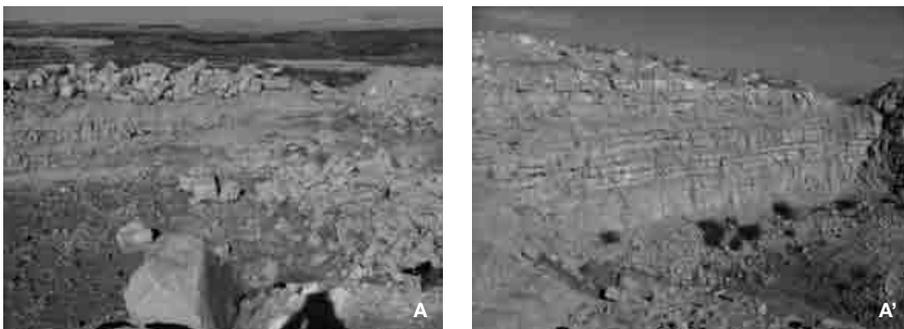


Figura A. Aspecto general de la explotación de la caliza campanil de Fraga

Figura A'. Frente de cantera (20 metros). Alternancia de estratos de caliza y margas

Sigla: 10-Az

Nombre Científico: Calclitita

Edad: Mioceno (Aquitaniense)

Formación: Caspe

Situación geográfica

La Piedra de Alcañiz se explota en la cantera "El Cielo" ubicada en el término municipal de Alcañiz (Teruel), en la parte SW de la hoja del mapa geológico nacional 469 Alcañiz escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Este 00° 07' 10"

Latitud Norte 41° 02' 04"

X 257.841 Y 4546.658 Z 420

Empresa: Piedra Natural Rubio, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La arenisca de Alcañiz pertenece a la formación Caspe (Edad Aquitaniense). Se trata de una formación detrítica con características litológicas y morfológicas variables (Quirantes, 1978) que recubre toda la depresión del Bajo Aragón.

Las areniscas que encontramos en la zona forman cordones de desarrollo lateral muy variable, presentándose en niveles tanto tabulares como lenticulares. Estos niveles pertenecen a paleocanales generados por la divagación de una extensa red fluvial, sobre depósitos de zonas proximales, medias y marginales de un sistema de abanicos aluviales de procedencia Ibérica.

La Piedra de Alcañiz se explota en bancos subhorizontales de 2 hasta 6 metros de potencia, separados por interestratos arcillosos-limosos, que corresponden a paleocanales fluviales con gran continuidad lateral. El diaclasado presenta un espaciado de orden métrico (4-5 m). Las areniscas que conforman estos paleocauces se presentan bien clasificadas y presentan frecuentemente estratificación cruzada. Los paleocauces geoméricamente se pueden subdividir en alargados y meandriformes apareciendo en diferentes niveles a lo largo de la serie (Gisbert *et al.*, 2004).

Los estratos se presentan subhorizontales y poco deformados, lo que condiciona la explotación mediante minería de contorno a lo largo de los afloramientos de los bancos de areniscas. El método de explotación es por banqueo.



Figura A. Aspecto general de la explotación de la arenisca de Alcañiz

Figura A'. Extracción de bloques con banqueadora. Potencia del frente 6 metros

Sigla: 11-Ta

Nombre científico: Grauvaca lítica

Edad: Triásico inferior

Formación: Facies Buntsandstein

Situación geográfica

La laja de Tabuenca se explota en la cantera "Coscollar" ubicada en el término municipal de Tabuenca (Zaragoza), en la parte NW de la hoja del mapa geológico nacional 382 Épila escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 28' 00"

Latitud Norte 41° 38' 40"

X 627.699 Y 4611.518 Z 580

Empresa: Piedra natural de Tabuenca S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La formación en facies "Buntsandstein" está constituida por areniscas rojas de origen fluvial y se depositó en condiciones de clima árido, en cuencas continentales. Presenta una potencia superior al centenar de metros y, en función de sus materiales, puede subdividirse en dos tramos.

El primer tramo, entre 5 y 10 metros, está integrado por conglomerados con cantos de cuarzo y matriz arcilloso-arenosa, con costras de limolita; sobre ellos se sitúan de 50 a 70 metros de areniscas rojas, de grano fino a medio, que poseen cemento silíceo y se disponen en potentes bancos masivos, con numerosas estructuras de corriente. El conjunto está interpretado como sedimentos de abanicos aluviales y cursos fluviales.

El segundo tramo corresponde a ambientes de cursos fluviales meandriformes y consiste en una alternancia de lutitas y areniscas en estratos de espesor métrico de bases irregulares, con estratificación cruzada de unos 70 metros de potencia.

Las areniscas explotadas en Tabuenca son de grano medio a grueso y se presentan en bancos de potencia variable, que pueden ser masivos o pueden presentar estratificación cruzada y/o laminación paralela, separados por tramos arcillosos. La explotación se realiza en bancos de una altura variable, según la alteración de la roca. En general, no se sobrepasan los 4 metros. Se extrae la capa superficial de tierra vegetal hasta que se descubre la roca aprovechable.



Figura A. Aspecto general de la explotación de la arenisca de Tabuenca.

Figura A'. Palés de lajas de arenisca de Tabuenca para venta como losado rústico.

Sigla: 12-Ca

Nombre científico: Biopelmicrita-Packstone de peloides y pelecípodos

Edad: Jurásico medio (Bathonense)

Formación: Chelva

Situación geográfica

El mármol Negro de Calatorao se explota en diferentes canteras situadas todas ellas en este municipio de la provincia de Zaragoza, en el contacto entre la vertiente N de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica y el borde meridional de la Depresión del Ebro, en pleno glacis o piedemonte de la Sierra de Algirén, en la parte SE de la hoja del mapa geológico nacional 382 Épila escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 21' 10" Latitud Norte 41° 31' 04"

X 637.452 Y 4597.629 Z 360

Empresas: CIM-PYMCASA-ANIA.

Situación geológica y Características de la explotación

La formación carbonatada de Chelva presenta en este sector una potencia de 300 metros. Inicialmente presenta una alternancia de margas grises y calizas nodulosas, sobre estos niveles se dispone un conjunto de calizas masivas y tableadas con abundantes esponjas y calizas tableadas de color gris. En estas últimas, se localizan las canteras. Finalmente la serie culmina con una alternancia de margas y calizas. Las facies y los fósiles que presenta esta formación indican que se depositó en un ambiente de plataforma marina somera y restringida.

La roca que se extrae aparece en estratos o bancos de geometría tabular de entre 0,4 y 1,7 metros de espesor que afloran en cerros aislados, que topográficamente resaltan sobre la llanura formada por materiales miocenos. Estos bancos se disponen según una dirección de 20° con respecto al N y buzamientos de hasta 15° tanto al E como al W, de manera que en conjunto dibujan una suave estructura anticlinal cuyo eje se orienta en dirección N-S. Los frentes de cantera se sitúan en la charnela de dicho anticlinal, quedando los materiales explotados recubiertos por materiales arcillosos y arenosos del Terciario.

La potencia de los estratos y el espaciado de las fracturas determina el tamaño de los bloques, que suele ser de 0,7 x 4 x 3 metros y alcanzan máximos de 1,6 x 4 x 3 metros cuando se explota la capa de mayor espesor.



Figura A. Aspecto general de la explotación caliza Calatorao de la empresa Pymcasa

Figura A'. Aspecto general de la explotación caliza Calatorao de la empresa Cim

Sigla: 13 Pu

Nombre científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides

Edad: Jurásico superior (Titónico)

Formación: Higuieruelas

Situación geográfica

El amarillo Puebla se explota en la cantera "Rubio" ubicada en el término municipal de La Puebla de Albornón (Zaragoza), en la parte SE de la hoja del mapa geológico nacional 411 Longares escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 51' 55"

Latitud Norte 41° 21' 45"

X 678.559 Y 4581.279 Z 540

Empresa: Explotación de canteras y piedras aragonesas, SL. ECMYPA, SL.

Situación geológica y Características de la explotación

La formación Higuieruelas está constituida por una sucesión de hasta 100 m de potencia de calizas masivas o estratificadas en bancos gruesos, con variedad de componentes aloquímicos, entre los que destacan los oncoides. Estos materiales se originaron en un mar de escasa profundidad, en las zonas media a interna de una rampa carbonatada. Los afloramientos forman parte de charnelas de anticlinales de gran radio, con ejes de orientación variable. Desde el punto de vista litoestratigráfico, las rocas aflorantes corresponden a una unidad de gran extensión a lo largo de toda la Cordillera Ibérica. Dentro de esta formación se diferencian, en el entorno de La Puebla de Albornón, dos grandes tramos.

Los materiales explotados se encuentran dentro del tramo superior en que la formación Higuieruelas presenta una litología particular que no se observa más que de manera local. Se trata de un tramo de calizas bien estratificadas con estratos de espesores métricos 1,2-1,8 metros y con una potencia total que oscila entre los 5-20 metros, ya que sobre él se encuentra la superficie de erosión previa al depósito del Terciario. El paleosuelo Mioceno es el responsable tanto del color de la roca como de su recristalización y sellado de fisuras, prueba de ello es que esta formación solo se explota en este sector. El color es heterogéneo y son habituales las geodas de hasta 4 cm de diámetro con distribución irregular a lo largo del frente de cantera.

El método de explotación es por banqueo. Se explota aprovechando la intersección de los estratos con la fisuración generando unos bloques promedio de 3 x 2 x 1,5 metros mediante perforadora o mediante hilo en función del estado de fracturación.



Figura A. Aspecto general de la explotación de La Puebla de Albornón

Figura A'. Frente de cantera de 6 metros de potencia. Explotación "Rubio"

Sigla: 14-AI

Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Edad: Cretácico inferior (Barremiense superior-Aptiense basal) **Formación:** Alacón

Situación geográfica

La caliza Oro Viejo o Antigua se explota en la cantera "Alacón-1" ubicada en el término municipal de Alacón (Teruel), en el límite SE de la hoja del mapa geológico nacional 467 Muniesa escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 41' 10"

Latitud Norte 41° 01' 04"

X 694.565 Y 4543.390 Z 660

Empresa: Piedra Natural de Alacón, S.L

Situación geológica y Características de la explotación

La formación Alacón es una formación marina, que se reconoce en el sector central de la Cordillera Ibérica en la subcuenca de Oliete y que puede aparecer incompleta o condensada. Es una sucesión calcárea de 80 metros de potencia con intercalaciones margosas que disminuyen progresivamente hacia el techo de la serie. Se organiza en pequeñas secuencias estratocrecientes de margas, margocalizas y calizas bioclásticas que a veces tienen estratificación cruzada. En la base pueden aparecer carofitas que dan paso a abundante fauna marina. El ambiente sedimentario de su formación fue de bahía parcialmente aislada del mar abierto con importantes aportes detríticos del continente.

Las rocas explotadas son calizas bioclásticas grises y pardas algo arenosas, dispuestas en estratos irregulares que alternan con niveles margosos. Las calizas presentan una laminación centimétrica que se altera en superficie y es la responsable de que la roca se separe en lajas y bloques. Las capas se orientan en una dirección E-W, con buzamientos máximos de 10°. La explotación se realiza en bancos con una altura variable, según la alteración de la roca. En general, no se sobrepasan los 2 metros.



Figura A. Aspecto general de la explotación de la Piedra Natural de Alacón, S.L.

Figura A'. Palés de lajas de caliza de Alacón para venta como losado rústico

Sigla: 15-Ce	Nombre científico: Sparstone
Sigla: 19-To	Nombre científico: Bioesparita-Grainstone bioclástico
Sigla: 23-Mq-1	Nombre científico: Biomicrita-Packstone bioclástico
Sigla: 24-Mq-2	Nombre científico: Bipelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides
Sigla: 25-Pm	Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico
Edad: Cretácico (Albiense-Cenomaniense)	Formación: Mosqueruela

Situación geográfica

La Laja Fósil Blanca (15-Ce) se explota en la cantera "Cuevas" ubicada en el término municipal de Cuevas de Almuden (Teruel), hoja del mapa geológico nacional 518 Montalbán escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 49' 21"
Latitud Norte 40° 45' 17"
X 683.823 Y 4513.888 Z 1420

Empresa: Naturlosa, S.L.

La Piedra Caliza Torre Villoros (19-To) se explota en la cantera "Torre Villoros" ubicada en el término municipal de Villarlengo (Teruel), en la zona W de la hoja del mapa geológico nacional 544 Forcall escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 40° 34' 50"
Latitud Norte 0° 29' 00"
X 713.011 Y 4495.318 Z 1700

Empresa: Casiano Explotaciones, S.A.

La Laja Fósil Blanca (23-Mq1) se explota en la cantera "Loma Cabezuelo 3" ubicada en el término municipal de Mosqueruela (Teruel), en la zona SW de la hoja del mapa geológico nacional 569 Villafranca del Cid escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 27' 33"
Latitud Norte 40° 22' 52"
X 715.695 Y 4473.234 Z 1540

Empresa: Losa Rústica, S.C.L.

La Laja Ciega Blanca (24-Mq21) y la laja Ciega Gris (24-Mq22) se explotan en la cantera "Ciega A" ubicada en el término municipal de Mosqueruela (Teruel), en la zona SE de la hoja del mapa geológico nacional 568 Alcalá de la Selva escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 31' 39"
Latitud Norte 40° 23' 19"
X 709.870 Y 4473.903 Z 1800

Empresa: Losa Rústica, S.C.L.

La Laja Gris Verde Monte (24-Mq23) y la laja Blanca Paja (24-Mq24) se explotan en la cantera "Las Pereras" ubicada en el término municipal de Mosqueruela (Teruel), en la zona SW de la hoja del mapa geológico nacional 569 Villafranca del Cid escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 22' 25"

Latitud Norte 40° 24' 22"

X 722.876 Y 4476.222 Z 1420

Empresa: Piedras Mosqueruela, C. B.

La Losa Blanca-Fósil Blanca (25-Pm) se explotan en la cantera "Ampolas" ubicada en el término municipal de Puertomingalvo (Teruel), en la zona NW de la hoja del mapa geológico nacional 592 Villahermosa del río escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 26' 31"

Latitud Norte 40° 17' 26"

X 717.448 Y 4463.223 Z 1320

Empresa: Ayuntamiento de Puertomingalvo.

Situación geológica y características de la explotación

Las calizas de la formación Mosqueruela se explotan como lajas en 6 canteras diferentes en las que se extraen 8 variedades. La formación Mosqueruela forma parte de la serie del Cretácico que aflora en la Cordillera Ibérica Oriental, conocida como el Maestrazgo en sentido amplio. Sus afloramientos se sitúan en la región que se extiende al E del río Jiloca y al S de las formaciones paleozoicas de las Sierras de Cucalón y Montalbán. Por el E alcanza el Maestrazgo de la provincia de Castellón.

Su considerable espesor se establece entre los 150 y 200 metros de potencia. Está constituida por una sucesión carbonatada, con algunos niveles terrígenos o margosos de menor importancia, bien estratificada en estratos finos de espesor generalmente centimétrico y con juntas margosas muy finas en los interestratos. A grandes rasgos, está compuesta por tres grandes sucesiones o secuencias, que comienzan con materiales terrígenos y/o margas y terminan con calizas.

- El miembro inferior presenta importantes variaciones de espesor que oscila entre los 20 y 70 metros y lo constituyen las calizas de Cuarto Pelado (calizas bioclásticas con Neorbitolinopsis).
- El miembro medio cuyo espesor oscila entre los 40-50 metros son las calizas y margas del Pinarueco, caracterizadas por la presencia de Orbitolina Duranddelgai.
- En el miembro superior cuyo espesor oscila entre los 45-70 metros abundan las margas y calizas del Puerto de Villarroya, cuyas capas contienen Praealveolinas y Exogyra. Sobre esta última secuencia aparecen de una manera bastante brusca y neta las dolomías masivas o en gruesos bancos que caracterizan la formación suprayacente de dolomías del Barranco de los Degollados.

La explotación se realiza en bancos con una altura variable. Se explotan los niveles superiores lajosos por meteorización, en general sin sobrepasar los 2 metros, de una serie de estratos de potencia decimétrica con un suave buzamiento. Se extrae la capa superficial de tierra vegetal hasta que se descubre la roca aprovechable, a continuación se arrancan los estratos superficiales que presentan un lajado natural por meteorización mediante retroexcavadora. Las losas son extraídas, seleccionadas y paletizadas manualmente por espesores en el mismo frente de explotación. El estéril es trasladado a la zona de vertedero mediante retroexcavadora.



Figura A. Frente de la cantera "Loma Cabezuelo 3", potencia 2 metros

Figura A'. Frente de la cantera "Las Pereras", potencia 1,8 metros

Sigla: 16-VI-I **Nombre científico:** Sparstone
Sigla: 17-CF **Nombre científico:** Sparstone
Edad: Cretácico superior (Cenomaniense-Senoniense) **Formación:** Órganos de Montoro

Situación geográfica

El Crema Maestrazgo (16 VI-I) y el Crema Fósil (17 CF) se explotan en la cantera "Muela Carrascosa" ubicada en el término municipal de Villarluego (Teruel), en el límite SW de la hoja del mapa geológico nacional 519 Aguaviva escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 27' 20"

Latitud Norte 40° 40' 20"

X 715.068 Y 4505.564 Z 1180

Empresa: Canteras CMC, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La formación Órganos de Montoro se enmarca en los confines del Sistema Ibérico Oriental (Rama Aragonesa) y de la Cadena Catalana. En esta formación se pueden observar tres términos diferentes. En el primero aparecen 50 metros de calizas de tonos grises o blancuzcos dispuestas en estratos de espesor centimétrico a decimétrico. La serie continúa con 20-25 metros de calizas grises, con pseudomorfos de yesos y huellas de desecación. Finalmente, la serie termina con unos 5-10 metros de alternancia de margas.

Los bancos de caliza explotados son masivos y subhorizontales, alcanzan potencias de hasta 6-7 metros y permiten el desarrollo de grandes frentes. En el mismo yacimiento aparecen diferentes subtramos en los que se explotan 3 variedades comerciales diferentes:

La caliza Crema Maestrazgo aparece en la parte más alta de la serie y corresponde a una caliza cristalina de grano muy fino con un bajo contenido en fósiles. El espesor medio de este nivel es de 4,3 metros.

Inmediatamente debajo de este nivel aparecen unos bancos de una caliza fosilífera de grano fino y tono crema claro. El espesor medio de este nivel es de 7 metros y en el se explota la caliza Fósil Superior.

En la parte inferior de la serie se explota la caliza Fósil Inferior. Se trata de una caliza fosilífera de grano fino. El espesor de este tramo en esta zona oscila entre los 13 y 25 metros.



Figura A. Aspecto general de la explotación "Muela Carrascosa"

Figura A'. Frente de cantera de 15 m de potencia. Explotación "Muela Carrascosa"

Sigla: 18-VI-II

Nombre científico: Caliza travertínica recristalizada-Sparstone

Edad: Mioceno

Situación geográfica

El Travertino Nogal Montoro se explota en la cantera "El Cantalar" ubicada en el término municipal de Villaluengo (Teruel), en el límite SE de la hoja del mapa geológico nacional 518 Montalbán escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 35' 40"

Latitud Norte 40° 40' 20"

X 703.328 Y 4505.233 Z 1200

Empresa: Canteras CMC, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

Los materiales en los que se pretende desarrollar la explotación son de edad miocena y se localizan en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica.

En la actualidad esta cantera no se encuentra en activo, pero está prevista su apertura para la extracción de caliza travertínica a partir de una serie subhorizontal de bancos masivos sin diaclasado significativo, que permiten el desarrollo de grandes frentes y la extracción de bloques de gran tamaño. Son frecuentes paleokarstificaciones en formas de bolsadas de 1x2x10 metros rellenas de travertino de caverna así como los cambios en la macroporosidad a lo largo del frente de explotación.



Figura A. Aspecto general de la posible ubicación de la explotación "El Cantalar"

Figura A'. Zona de extracción del material para su caracterización. Escarpe 50 m

Sigla: 20-Mi

Nombre científico: Bioesparita-Grainstone bioclástico

Edad: Cretácico inferior (Bedouliense)

Formación: Chert

Situación geográfica

La Losa Ocre se explota en la cantera "María del Carmen" ubicada en el término municipal de Mirambel (Teruel), en la zona central de la hoja del mapa geológico nacional 544 Forcall escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 21' 37"

Latitud Norte 40° 35' 27"

X 723.394 Y 4496.764 Z 940

Propietario: Gervasio Martí.

Situación geológica y Características de la explotación

La Formación Calizas y Margas de Chert está compuesta por la alternancia de calizas ocre y beige, margocalizas y margas marrones. Las calizas se presentan en bancos de espesores que oscilan de decimétricos a métricos, siendo la serie estratocreciente y rica en restos fosilíferos. En la parte inferior aparecen areniscas y calizas arenosas, caracterizadas por presentar unas bases erosivas y bioturbación. En la parte superior se concentran calcarenitas y calizas bioclásticas. El ambiente de sedimentación corresponde a una plataforma con barras bioclásticas y la potencia máxima de la serie en este sector es de 140 metros.

Se explotan unas calizas arenosas (bioclásticas) de color ocre en bancos con un buzamiento de 15-20°. En el primer metro, estos materiales presentan un lajamiento centimétrico subparalelo a la estratificación. El origen de este lajamiento se encuentra en la meteorización, que separa los planos de discontinuidades preexistentes. Se retira la capa superficial de tierra vegetal hasta que se descubre la roca aprovechable y se extraen las lajas mediante retroexcavadora.



Figura A. Aspecto general de la cantera "María del Carmen"

Figura A'. Frente de cantera de 3,5 m de potencia. Niveles con lajamiento natural

Sigla: 21-Cv **Nombre científico:** Bioesparita-Grainstone bioclástico
Sigla: 22-Ig **Nombre científico:** Bioesparita-Grainstone bioclástico
Sigla: 26-No **Nombre científico:** Intraesparita-Grainstone intraclástico
Edad: Cretácico inferior (Albiense) **Formación:** Calizas Ocreas de Benasal

Situación geográfica

La Laja Verde (21-Cv1) se explota en la cantera "Pedra" ubicada en el término municipal de Cantavieja (Teruel), en la zona límite N de la hoja del mapa geológico nacional 569 Villafranca del Cid escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 21' 36"
 Latitud Norte 40° 29' 42"
 X 723.736 Y 4486.125 Z 1520

Empresa: Chimeneas Estar, S.L.

La Laja Paja (21-Cv2) se explota en la cantera "Capitán" ubicada en el término municipal de Cantavieja (Teruel), en el límite S de la hoja del mapa geológico nacional 544 Forcall escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 22' 55"
 Latitud Norte 40° 30' 35"
 X 721.828 Y 4487.704 Z 1340

Empresa: Garma Maestrazgo, S.L.

Existen diferentes canteras en el término municipal de La Iglesuela del Cid (Teruel) que explotan el mismo nivel estratigráfico. La Laja Amarilla Cortes (22-Ig) se explota en la cantera "Chozos" ubicada en la zona NE de la hoja del mapa geológico nacional 569 Villafranca del Cid escala 1:50.000. La misma variedad se explota en las canteras "Cuenca", "Molino" y "Cantomarin".

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 19' 20"
 Latitud Norte 40° 29' 40"
 X 726.940 Y 4486.160 Z 1260

Empresa: Chimeneas Estar, S.L.

La Losa Amarilla y Roja (26-No) se explota en la cantera "El Bolaje" ubicada en el término municipal de Nogueruelas (Teruel), en la zona NE de la hoja del mapa geológico nacional 591 Mora de Rubielos escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 0° 37' 32"
 Latitud Norte 40° 14' 40"
 X 701.976 Y 4457.670 Z 1140

Propietario: Ayuntamiento de Nogueruelas.

Situación geológica y características de la explotación

La Formación Calizas Ocreas de Benasal de edad Cretácico inferior (Albiense inferior) esta compuesta por calizas arenosas bioclásticas de tonos beige y rojos, distribuidas en pequeños bancos, con intercalaciones de margas y arcillas negruzcas, carbonosas. Estas calizas pueden ser lumaquéllicas, glauconíticas o nodulosas, generalmente con estratificación oblicua e incluso entrecruzada. Su potencia oscila entre los 100 y 200 m, siendo la serie estratodecreciente. Los bancos no presentan variaciones en la tonalidad. La única variación apreciable radica en el tamaño del grano de los fósiles presentes.

Esta formación se ha generado en una plataforma carbonatada interna, caracterizada por la fuerte influencia de las corrientes costeras. Respecto al contenido fósil, ha sido datada por la asociación de orbitolínidos (*Mesorbitolina Texana Texana*, *M. Minuta*, *Simplorbitolina Manasi*) y de melobesias (*Agardhiellopsis Cretacea*, *Kymalithon Belgicum*).

Se explotan los niveles subsuperficiales (hasta una profundidad de 1,5 metros), lajosos por meteorización, de una serie subhorizontal compuesta por estratos decimétricos a métricos (potencia máxima 2 metros), con algunas intercalaciones margosas. El diaclasado original, subperpendicular a la estratificación, tiene un espaciado métrico, reducido a decimétrico en los niveles explotados. Si se profundiza aparecen las mismas variedades pétreas pero masivas.



Figura A. Frente de cantera "El Bolaje". Niveles subsuperficiales con lajado natural

Figura A'. Frente de cantera "Chozos". Niveles subsuperficiales con lajado natural



Figura B. Frente de cantera "Pedra". Niveles subsuperficiales con lajado natural

Figura B'. Palés de lajas de caliza para venta como losado rústico. Cantera "Capitán"

Sigla: 27-Tr

Nombre científico: Caliza travertínica recristalizada-Sparstone

Edad: Mioceno inferior

Situación geográfica

El Travertino Teruel se explota en la cantera "Monteagudo" ubicada en el término municipal de Villalba Baja (Teruel), en la zona central de la hoja del mapa geológico nacional 567 Teruel escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 04' 00"

Latitud Norte 40° 23' 20"

X 664.101 Y 4472.794 Z 980

Empresa: Mármoles L.Lorens, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La cantera se ubica en calizas travertínicas de color crema claro, muy porosas, pero también muy coherentes en bancos horizontales muy potentes (hasta 8-10 m) pero lateralmente discontinuos. Lateral y verticalmente pasan en transición a yesos y margas. Estos materiales corresponden al relleno de la fosa de Alfambra-Teruel bajo un régimen continental.

La roca explotada es masiva, oquerosa y de grano fino. Se explotan estratos horizontales muy potentes (hasta 8 metros), pero lateralmente discontinuos. Se extrae en bloques de 2,5 x 1,5 x 1,5m.

El método de explotación es por banqueo. La altura media del banco es de 6 a 8 metros, que coincide con la potencia de caliza aprovechable. Se dividen en volúmenes iniciales con altura equivalente a la altura del banco, a continuación se subdividen los bloques en volúmenes inferiores y se escuadran hasta obtener el tamaño del bloque comercial.



Figura A. Aspecto general de la cantera "Monteagudo"

Figura A'. Sistema de corte en la cantera mediante hilo diamantado

Sigla: 28-Crt

Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Edad: Turolense

Formación: Calizas y margas de edad Turolense.

Situación geográfica

El Crema Teruel se explota en el paraje "Barranco de la laguna" ubicado en el término municipal de Tortajada (Teruel), en el límite SW de la hoja del mapa geológico nacional 567 Teruel escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 03' 00"

Latitud Norte 40° 23' 40"

X 665.502 Y 4473.441 Z 1010

Empresa: Mármoles Llorens, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

Las calizas y margas de edad Turolense presentan en este sector una potencia de 40 m, formando una alternancia de calizas blancas subhorizontales bien estratificadas con niveles margosos y arcillosos que, ocasionalmente, pueden ser lignitíferos. Estas calizas dan lugar a relieves estructurales tabulares con escarpes bastante netos y corresponden a micritas y biomicritas de bivalvos y gasterópodos. Las primeras presentan restos de actividad algal, así como macroporosidad por bioturbación de raíces. Las segundas poseen un contenido fosilífero del 20-30%. La roca se formó en un medio lacustre situado en la parte distal de un sistema de abanicos aluviales. Estas calizas presentan una intensa recristalización que no se observa en el resto de calizas miocenas. Esta recristalización a título hipotético la interpretamos como resultado de surgencias de aguas calientes.

Se aprovechan tres bancos calizos subhorizontales de potencia 1,8 m, 5,5 m y 5 m, entre los que se intercalan arcillas y limos. Los dos primeros bancos presentan una extensa continuidad lateral, mientras que el banco tercero pasa lateralmente a materiales más detríticos. Estos bancos se ven afectados por fallas, de direcciones N-S y E-W. El método de explotación es por banqueo mediante corte con hilo diamantado.



Figura A. Aspecto general de la cantera "Barranco de la Laguna"

Figura A'. Frente de explotación, bancos de 2,5 m de potencia

Sigla: 29-A **Nombre científico:** Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides
Sigla: 30-D **Nombre científico:** Sparstone
Edad: Cretácico superior (Turoniense superior-Coniaciense)
Formación: Embalse de La Tranquera

Situación geográfica

El Abanto Primera (29-A) y el Abanto Comercial (30-D) se explotan en la Cantera "Leonardo" ubicada en el término municipal de Abanto (Zaragoza), en el límite N de la hoja del mapa geológico nacional 464 Used escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 43' 10"
 Latitud Norte 41° 08' 04"
 X 607.510 Y 4552.702 Z 1080

Empresa: Canteras Abanto.

Situación geológica y Características de la explotación

La formación Embalse de La Tranquera, equivalente lateral de la formación Órganos de Montoro, se divide en 2 tramos y está formada por una sucesión litológica principalmente dolomítica, groseramente cristalina, de unos 70 metros de potencia. En el tramo inferior se localiza la explotación que posee una potencia de 50 m, formada por dolomías blanquecinas masivas con fantasmas de biotopos de rudistas recristalizados. En los niveles poco (o nada) dolomitizados se observan texturas Packstone y Grainstone. El medio sedimentario se interpreta como un medio de depósito de plataforma interna restringida.

Los estratos calcáreos canterables, presentan un espesor medio de 1 a 3 metros de potencia individual y se disponen en una serie homoclinal, con dirección media N120°E y buzamientos generalmente suaves (inferiores al 15°) hacia el SW. Se diferencian diferentes variedades litológicas en función del alcance de los procesos de dolomitización, abarcando desde términos que no han sufrido dolomitización hasta términos completamente dolomitizados en los que se ha perdido la textura original.

Son abundantes los estilolitos de color marrón rojizo que conforman una retícula de densidad irregular. El método de explotación es a cielo abierto con corte horizontal mediante rozadora de brazo y corte vertical con hilo diamantado. El frente de explotación presenta una potencia de 15 metros y una longitud de 30 metros.



Figura A. Aspecto de la explotación. Frente de 8 m de potencia

Figura A'. Sistema de corte mediante rozadora de brazo en la cantera "Leonardo"

Sigla: 31-BI**Nombre científico:** Dolosparstone**Edad:** Cretácico superior (Turoniense-Coniaciense)**Formación:** Barranco de los Degollados

Situación geográfica

Las variedades Blancas Crema (31-BI1), Blancas Jaspe (BI2) y Blancas Moka (BI3) se explotan en la Cantera "El Sabinar" ubicada en el término municipal de Blancas (Teruel), en la zona SW de la hoja del mapa geológico nacional 491 Calamocha escala 1:50.000.

Sus coordenadas geográficas de referencia son:

Longitud Oeste 1° 27' 40".

Latitud Norte 40° 51' 00"

X 629.724 Y 4523.324 Z 1110

Empresa: Mármoles Ferrer, S.L.

Situación geológica y Características de la explotación

La Formación Dolomías del Barranco de los Degollados esta compuesta por una sucesión de dolomías ocres y grises, de grano fino y en pequeños bancos hacia la base y de grano más grueso y masivas hacia la parte alta. Su espesor se mantiene en torno a los 40 m. En la parte alta se reconocen rudistas (Durania). Se interpretan como depósitos de plataforma carbonatada, que pasa de abierta a restringida.

Los materiales explotados se localizan en las proximidades de la fosa del Jiloca en la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica. Las capas se orientan según una dirección N-S y presentan un buzamiento suave de 12°E. Esta disposición es favorable para la extracción por bancos separados por la superficie de estratificación.

En la explotación se diferencian 3 bancos principales. De muro a techo: banco de 2,2 m de espesor de dolomías beige tableadas con abundantes fósiles y presencia de ooides. El intermedio es un nivel de 0,5 m de dolomía beige blanquecina con intensa bioturbación y el banco superior es un estrato de 5 m de dolomía blanquecina en el que disminuye el grado de bioturbación respecto al banco intermedio. Los tres niveles aparecen fracturados y con intercalaciones margosas milimétricas y centimétricas. El frente de cantera presenta un desarrollo longitudinal de aproximadamente 200 m y la morfología del terreno condiciona la explotabilidad, quedando el área canterable limitada al E y W por dos barrancos de incisión lineal. La extracción del material se realiza mediante serrucho.



Figura A. Sistema de corte mediante serrucho en la cantera "El Sabinar"

Figura A'. Frente de cantera, en el que se observan los tres bancos explotados

V. Caracterización tecnológica

V.1. Introducción

La calidad de un material pétreo para ser utilizado con fines constructivos es función de sus características intrínsecas, de las condiciones ambientales y de su posición relativa en obra. Por tanto, es de vital importancia la caracterización tecnológica de la piedra natural para poder determinar su correcta adecuación de uso.

La interpretación de las relaciones entre la mineralogía y la textura de los materiales pétreos con las propiedades físicas y su comportamiento mecánico, permite "predecir" el comportamiento que presentarán los materiales, así como extraer conclusiones sobre su utilización más idónea: revestimientos de interiores o exteriores, pavimento interior o exterior, cubiertas, etc.

En este capítulo se van a exponer los resultados de los ensayos a los que han sido sometidas diferentes rocas aragonesas en función de su uso constructivo predominante. Las rocas caracterizadas en cada cantera han sido únicamente las explotadas comercialmente. En algunas canteras se han caracterizado diferentes variedades y en otras una única variedad. Las tandas de ensayos a las que han sido sometidas las diferentes variedades ha dependido tanto del uso constructivo predominante del material, como de la disposición para colaborar mostrada por los diferentes canteros.

Los valores numéricos obtenidos a partir de estos ensayos normalizados permiten tener datos objetivos para evaluar la aptitud de los materiales para su uso en aplicaciones constructivas, tanto en la rehabilitación arquitectónica de edificios históricos, como en obra civil moderna.

El comportamiento de la piedra natural, respecto a algunos de los ensayos de caracterización recogidos en la presente tesis doctoral, presenta diferencias en función de su acabado superficial (García del Cura *et al.*, 2008). Esto ocurre en ensayos tales como resistencia al deslizamiento sin pulimento o resistencia al desgaste por abrasión. La variación en la resistencia mecánica de la piedra natural en función del acabado superficial no es un objetivo de esta investigación, por ello remarcamos que todos los resultados de los ensayos tecnológicos recogidos, en los que la normativa no indica un acabado superficial específico, se corresponden con variedades pétreas que presentan un acabado superficial de corte de sierra.

En mayor o menor medida, la mayor parte de los materiales pétreos presentan un comportamiento anisótropo (propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas varían según la dirección en que son examinadas) respecto a ciertas propiedades físicas. La presunción de que los materiales pétreos pueden presentar un comportamiento isótropo es solo válido para rocas que presenten una distribución al azar de sus minerales, poros, etc. (Siegesmund, 1996). La anisotropía de las propiedades tanto físicas como mecánicas es uno de los factores más importantes para la evaluación de la calidad de un material pétreo como elemento de uso constructivo, ya que, frecuentemente, estos materiales se utilizan tras ser cortados según diferentes orientaciones para realzar efectos decorativos o simplemente para aprovechar los restos de corte.

Estas posibles anisotropías en las propiedades físicas y mecánicas son de gran importancia dado que, en gran medida, controlan las pautas de la alteración de los materiales pétreos una vez situados como elementos constructivos u ornamentales en un edificio (Sebastián and Zezza, 1992; Rodríguez-Navarro *et al.*, 1994). En muchas ocasiones la presunción de un comportamiento isótropo de la roca es de una gran simplificación y puede conducir a errores geomecánicos sistemáticos (Duellman and Heitfeld, 1978).

Los principales factores que controlan la dependencia direccional de las propiedades petrofísicas son las anisotropías de la fábrica de la roca (estratificación, fisuras, grietas, fósiles, tamaño y geometría de los macroporos). Dado que los materiales pétreos no presentan el comportamiento de un sólido ideal, ya que presentan una extensión limitada y no son cuerpos isótropos y homogéneos, se ha realizado un estudio geoestadístico con los valores obtenidos a partir de los diferentes ensayos, para poder valorar la influencia de estas inhomogeneidades en el comportamiento del material.

El estudio estadístico realizado para valorar el comportamiento de estos materiales ha consistido en un análisis de la varianza Anova y en el cálculo de una serie de parámetros estadísticos.

El análisis de la varianza (Anova) se ha realizado para los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia al choque, microdureza Knoop, desgaste por abrasión y de resistencia a flexión. El objeto de este análisis ha sido valorar si las posibles diferencias mecánicas existentes en función de la orientación de la probeta durante la realización de los ensayos son debidas a la anisotropía del material o a su propia variabilidad.

El análisis de la varianza (Anova) ha sido aplicado para ensayar la hipótesis nula suponiendo un 95% como nivel de confianza. La confirmación de la hipótesis nula (H_0) la consideramos para probabilidades superiores al 0,05 (5%) y presupone que las variaciones de la propiedad física considerada son resultado de errores experimentales. Cuando se rechaza H_0 es porque el Anova indica que existen subconjuntos de muestras con comportamiento diferente (probabilidad H_0 inferior a 0,05) para la propiedad física que se está midiendo.

Los parámetros estadísticos estudiados han sido el valor medio, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de anisotropía:

- Valor medio: Constante que representa el centro de gravedad de la ley de probabilidad de una variable aleatoria y que, en casos de notable simetría en la función de densidad, puede interpretarse que dicha constante nos señala la zona donde se sitúan los valores de máxima probabilidad de la variable aleatoria.

$$\bar{X} = \sum_i X_i / n$$

- Desviación estándar: Se define como el promedio de lejanía de los puntajes respecto del promedio.

$$s^2 = \pm \sum (X_i - \bar{X})^2 / n - 1$$

- Coeficiente de variación: Cociente entre la desviación estándar y la media aritmética.

$$v = s / \bar{X}$$

- Coeficiente de anisotropía: Se han utilizado dos coeficientes de anisotropía diferentes según el número de orientaciones en las que se han realizado los ensayos.
 - a) Para ensayos realizados según dos direcciones perpendiculares entre sí, el coeficiente de anisotropía utilizado ha sido el cociente entre la diferencia del valor máximo y mínimo y el valor máximo (Pernia *et al.*, 1986).
 - b) Para ensayos realizados según tres direcciones perpendiculares entre sí, el coeficiente de anisotropía utilizado ha sido el cociente entre la diferencia de los valores máximo y mínimo y el valor promedio.

V.2. Fichas tecnológicas

Los resultados de la caracterización tecnológica de estos materiales se exponen a continuación en una serie de fichas tecnológicas para cada una de las variedades pétreas.

Cada una de estas fichas tecnológicas se divide en cuatro apartados: información general, descripción petrográfica, descripción de "visu" y resultados de los ensayos tecnológicos. En la tabla V-1 se presenta un cuadro resumen con la clasificación de las rocas caracterizadas.

V.2.1. INFORMACIÓN GENERAL

En esta primera parte de la ficha se incluyen los siguientes datos: nombre científico, nombre comercial, uso constructivo y número y sigla de cada roca.

Nomenclatura científica

Todas las rocas caracterizadas en la presente tesis doctoral son rocas sedimentarias y, atendiendo a su génesis, se clasifican como rocas detríticas y rocas carbonatadas.

Clasificación de las arenitas:

La clasificación de las arenitas utilizada ha sido la propuesta por Pettijohn *et al.*, (1987). Esta clasificación se basa en una clasificación composicional de la roca en la que se tienen en cuenta cuatro componentes (figura V-1): cuarzo monocristalino (Qm), feldspatos (Feld), fragmentos líticos de todo tipo junto a cuarzo policristalino (FL) y matriz. La matriz solo se considera en los intervalos del 15% y del 75%, independientemente de su origen. Según el contenido en matriz, las arenitas se dividen en arenitas propiamente dichas cuando el porcentaje de matriz es inferior al 15% y grauvacas cuando oscila entre el 15 y el 75%.

■ FIGURA V.1

Clasificación de las arenitas (tomada de Pettijohn *et al.*, 1987).



Pettijohn, clasifica a las arenitas que presentan en su composición más de un 50% de clastos carbonatados como Calclititas si estos proceden de la misma área fuente que proporciona los clastos detríticos y no de la cuenca de sedimentación.

Clasificación de las rocas carbonatadas:

Las rocas carbonatadas se han clasificado según las clasificaciones de Folk (1962) (figura V-2) y Dunham (1962) (figura V-3). Estas clasificaciones se basan en aquellas propiedades de los granos y/o de la fábrica que pueden relacionarse con alguna característica ambiental de la

■ FIGURA V.2

Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Folk, 1962)

COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE ALOQUÍMICOS		Más del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO I y II		Menos del 10% de aloquímicos ROCAS TIPO III		Rocas de biohermos	Dolomías			
		Cemento esparítico		Matriz micrítica			De 1 a 10% de aloquímicos	Menos del 1%	Con "sombas" o "fantasmas" de aloquímicos	Sin sombras
		TIPO I		TIPO II						
Más del 25% de INTRACLASTOS	Menos del 25% de COQUES (relación de volúmenes de pebales y bioclastos b/p)	INTRAESPARITA		INTRAMICRITA		MICRITA	BIOLITTO	Dolomía con Intraclastos		
		INTRAESPARRUDITA		INTRAMICRORRUDITA				MICRITA con Intraclastos	Dolomía con Ooides	
		OCESPARITA		OCMICRITA				MICRITA con Ooides	Dolomía con Bioclastos	
		OCESPARUDITA		OCMICRORRUDITA				MICRITA con Bioclastos	Dolomía con Peleoides	
		BIOESPARITA		BIOMICRITA				MICRITA con Peleoides		
BIOESPARRUDITA		BIOMICRORRUDITA								
BIOPELESPARITA		BIOPELMICRITA								
PELESPARITA		PELMICRITA								

■ FIGURA V.3

Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Dunham, 1962)

Textura original reconocible					Textura original no reconocible	
Componentes originales no enlazados durante el depósito				Componentes originales enlazados		CARBONATOS CRISTALINOS
Con matriz (carbonato de tamaño arcilla o limo fino)			Sin matriz y granosostenida			
Sostenida por la matriz		Granosostenida				
Menos del 10% de granos	Más del 10% de granos					
MUDSTONE	WACKSTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE		

cuenca de depósito, más concretamente con la energía del medio en la que se ha generado el sedimento. La textura de las rocas carbonatadas no es el resultado de este único factor. Así, los procesos diagenéticos pueden condicionar la aparición de características texturales propias. Por ello, además de la clasificación de Dunham (1962) se ha utilizado la modificación de esta clasificación propuesta por Wright (1992) en la que se consideran algunos procesos diagenéticos (figura V-4).

■ FIGURA V.4

Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Wright, 1992)

MEDIO DE DEPÓSITO				ACTIVIDAD BIOLÓGICA			DIAGÉNESIS				
Sostenida por la matriz		Granostenida		Organismos In situ			No obliterante		Obliterante		
<10% granos	>10% granos	Con matriz	Con cemento	Organismos aporifloradores	Organismos incrustantes	Edificios orgánicos rígidos	Componente fundamental Cemento	Contactos planos entre los granos	Contactos estriados entre los granos	Mezcla de cristales	
Calcimadstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Bafflestone	Boundstone	Framestone	Cementstone	Grainstone condensado	Grainstone sulfurado	Sparstone (>10µm)	Dolomiosparstone (>10µm)
	Floatstone	Rudstone con matriz	Rudstone con cemento	(rudistas)	(sepicas algales)	(corales)				Micro-sparstone (<10µm)	Dolomicro-sparstone (<10µm)
Granos > 2mm											

Nomenclatura comercial

La clasificación comercial presentada corresponde al nombre con el que los industriales introducen sus materiales en los circuitos comerciales, existiendo en la mayoría de los casos importantes diferencias entre esta nomenclatura y la científica.

Nomenclatura de uso constructivo

Tecnológicamente, tal como justificamos en la introducción terminológica del capítulo I, las rocas se han agrupado en tres grupos en función de su uso constructivo predominante: lajas, piedra de cantería y roca ornamental (tabla V-2).

- Lajas; rocas que se emplean en pavimentos, como losa fina de cubiertas, revestimientos de mampostería y sillarejo. Estas rocas son utilizadas directamente tras su extracción en cantera, ya que se parten según planos paralelos a la estratificación, sin ningún tipo de elaboración.
- Piedra de cantería; a los usos de las lajas se suman los de sillares, labra y placas aserradas con distintos acabados. Estas rocas han sufrido un proceso de elaboración sencillo de corte y/o labra.
- Roca ornamental; se emplea, además de todos los usos de cantería, en forma de placas pulidas. Estas rocas han tenido un proceso de acabado más elaborado, generalmente mediante pulido que realza su aspecto externo.

No existe un límite estricto entre cada uno de los tres tipos principales de usos constructivos, siendo posible que un material se comercialice para uno u otro uso. Así, se comercializan rocas que admiten pulido como piedras de cantería utilizándose, por tanto, para bordillos, adoquines y losas.

■ TABLA V-2

Cuadro resumen de los usos constructivos de las rocas caracterizadas

Usos Constructivos	Número y sigla	Nº de variedades
Roca Ornamental	12-Ca1, 12-Ca2, 12-Ca3, 13-Pu, 16-VI-I, 17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II, 27-Tr, 28-Crt, 29-A, 30-D, 31-BI1,31-BI2, 31-BI3	15
Piedra de Cantería	1-Ye, 2-Ma, 4-Hu, 5-Pa, 6-Un, 7-Ay, 8-Tu, 9-Fr, 10-Az	9
Cantería-Lajas	14-Al, 23-Mq1, 24-Mq21, 24-Mq22, 24-Mq23, 24-Mq24	6
Lajas	3-En, 11-Ta, 15-Ce, 19-To, 20-Mi, 21-Cv1, 21-Cv2, 22-Ig, 25-Pm, 26-No	10

V.2.2. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

En este apartado, además de la descripción detallada de las características petrográficas de cada una de las rocas caracterizadas, se incluyen fotografías en las que se recogen las principales características texturales y/o mineralógicas para cada una de ellas. En las fichas petrográficas los porcentajes de los componentes que no aparecen entre paréntesis hacen referencia al porcentaje sobre el total de la roca.

V.2.3. DESCRIPCIÓN DE VISU

La descripción de “visu” incluye, tanto la descripción general del material, como la de aquellos elementos estructurales y texturales que pueden provocar anisotropías en su comportamiento. Los principales elementos estructurales y texturales que controlan la dependencia direccional de las propiedades petrofísicas de las rocas son las anisotropías de la fábrica (estratificación, fisuras, grietas, fósiles, tamaño y geometría de los macroporos).

V.2.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS

Se ha diseñado un paquete específico de ensayos tecnológicos normalizados en función del uso constructivo predominante del material (tabla V-3). En estas fichas se han incluido, además de los resultados de estos ensayos, la desviación estándar y el coeficiente de variación para todos los ensayos realizados y el coeficiente de anisotropía para aquellos ensayos realizados en probetas con 2 o más orientaciones diferentes.

■ TABLA V-3

Ensayos tecnológicos realizados en función del uso constructivo predominante

	Roca Ornamental	Piedra de Cantería	Lajas
Absorción-densidad-porosidad	-----	-----	-----
Resistencia compresión	-----	-----	-----
Resistencia flexión	-----	-----	-----
Flexión tras heladicidad	-----	-----	-----
Resistencia al choque	-----	-----	-----
Desgaste por rozamiento	-----	-----	-----
Microdureza Knoop	-----	-----	-----
Colorimetría	-----	-----	-----
Desgaste por abrasión	-----	-----	-----
Resistencia al deslizamiento	-----	-----	-----
Planeidad	-----	-----	-----

■ TABLA V-1

Cuadro síntesis de clasificación de las rocas caracterizadas

Número-Sigla	Nombre científico	Nombre comercial	Uso constructivo
Rocas detríticas			
1. Ye	Litoarenita calcárea-Sedarenita	Piedra de Yesa	Cantería
2. Ma	Litoarenita calcárea-Sedarenita	Piedra de Martes	Cantería
3. En	Litoarenita calcárea-Sedarenita	Piedra de Ena	Lajas
4. Hu	Litoarenita calcárea-Sedarenita	Piedra Alto-Aragón	Cantería
5. Pa	Litoarenita-Filoarenita	Piedra de Pueyo	Cantería
6. Un	Calclitita	Piedra de Uncastillo	Cantería
7. Ay	Calclitita	Piedra de Ayerbe	Cantería
10. Az	Calclitita	Piedra de Alcañiz	Cantería
11. Ta	Grauvaca lítica	Laja de Tabuenca	Lajas
Rocas carbonatadas			
8. Tu	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Cantería
9. Fr	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Cantería
12. Ca1	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Ornamental
Ca2	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Ornamental
Ca3	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Ornamental
13. Pu	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Amarillo Puebla	Ornamental
14. Al	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Oro Viejo, Antigua	Cantería-lajas
15. Ce	Sparstone	Fósil Blanca	Lajas
16. VI-I	Sparstone	Crema Maestrazgo	Ornamental
17. CF-I	Sparstone	Crema Fósil Inferior	Ornamental
CF-S	Sparstone	Crema Fósil Superior	Ornamental
18. VI-II	Caliza travertínica recristalizada-Sparstone	Travertino Nogal Montoro	Ornamental
19. To	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Piedra caliza Villoros	Lajas
20. MI	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Losa Ocre	Lajas
21. Cv1	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Laja Verde	Lajas
Cv2	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Paja	Lajas
22. Ig	Bioesparita-Grainstone bioclástico	Amarilla Cortes, Laja Oro, Laja Plata	Lajas
23. Mq-1	Biomicrocita-Packstone bioclástico	Fósil blanca, Fósil Amarilla, Gris Raíces	Cantería-lajas
24. Mq-21	Pelmicrocita-Wackstone de peloides y bioclastos	Ciega Blanca	Cantería-lajas
Mq-22	Biomicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Ciega Gris	Cantería-lajas
Mq-23	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Gris Verde Monte	Cantería-lajas
Mq-24	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Blanca Paja	Cantería-lajas
25. Pm	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Losa Blanca, Fósil Blanca	Lajas
26. No	Intraesparita-Grainstone intraclástico	Losa Amarilla y Roja	Lajas
27. Tr	Caliza travertínica recristalizada-Sparstone	Travertino Teruel	Ornamental
28. Crt	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Crema Teruel	Ornamental
29. A	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Abanto Primera	Ornamental
30. D	Sparstone	Abanto Comercial	Ornamental
31. BI1	Dolosparstone	Blancas Crema	Ornamental
BI2	Dolosparstone	Blancas Jaspe	Ornamental
BI3	Dolosparstone	Blancas Moka	Ornamental

Sigla: 1-Ye

Nombre Científico: Sedarenita

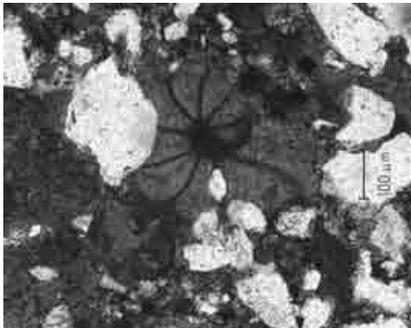
Nombre Comercial: Piedra de Yesa

Uso Constructivo: Cantería

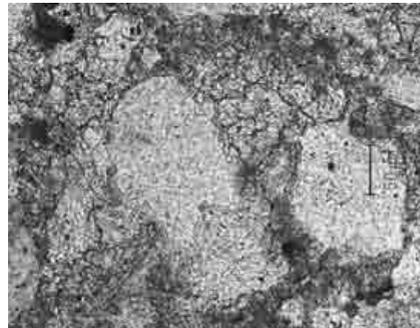
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra de Yesa” se describe como una arenita, clasificada como Litoarenita-Sedarenita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto 64% está compuesto por fragmentos de roca 34,3%, clastos de cuarzo 26,2% de tamaño medio 0,25 mm y feldespatos alterados 3,5%. Dentro de los fragmentos de roca, los más abundantes son los líticos carbonatados calcíticos (74,8%) tamaño medio 0,18 mm entre los que se diferencian caparazones calcíticos de foraminíferos, intraclastos (micritas con deformaciones plásticas) y clastos de esparita (generalmente monocristalina que en muchos casos podrían ser feldespatos reemplazados). Además de estos, se distinguen clastos de dolomita esparítica claramente detríticos (5,8%) y fragmentos de rocas metamórficas/volcánicas (filitas/felsitas) (19,3%). Los clastos metamórficos (filitas) son mayoritariamente agregados criptocristalinos de cuarzo, feldespato y micas.

Nícoles paralelos

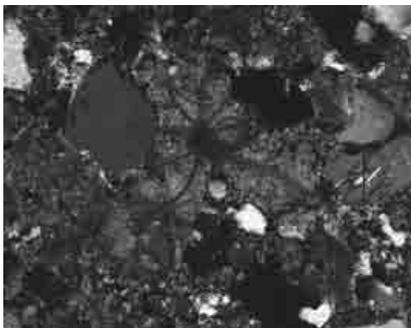


A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

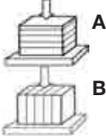
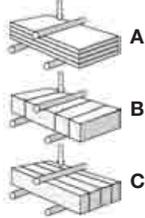
A-A' (x10) Aspecto general de la roca, zona teñida. Se diferencian clastos de cuarzo, fragmentos líticos carbonatados y bioclastos (foraminíferos) cementados por calcita

B-B' (x20) Clastos de cuarzo subangulosos monocristalinos y policristalinos y líticos carbonatados cementados por calcita esparítica. Escala 50 micras

El cemento es principalmente de calcita esparítica 30% y presenta un tamaño medio de 0,12 mm. En porcentajes inferiores al 2% es ferruginoso y de cuarzo sintaxial. La matriz micrítica se presenta con porcentajes entorno al 6%. Los contactos entre los clastos constituyentes son predominantemente largos y en menor proporción suturados. La morfología de los clastos es angulosa-subangulosa con un tamaño medio de 0,2 mm y un tamaño máximo de 0,7 mm. La selección varía entre 1,2-2.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color marrón amarillento moderado (Munsell: 10YR 5/4) de aspecto granudo y tamaño de grano fino a medio. No presenta macroporosidad apreciable ni tampoco discontinuidades abiertas.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación
Absorción	0,16%	0,023%	0,15
Densidad aparente	2686kg/m ³	5,59kg/m ³	0,002
Densidad real	2697kg/m ³	4,30kg/m ³	0,002
Porosidad abierta	0,42%	0,0062%	0,15
Resistencia a la compresión	A 147,5Mpa	11,63Mpa	0,20
			
Resistencia a la flexión	A 28,30Mpa	1,05Mpa	0,01
			

Sigla: 2-Ma

Nombre Científico: Sedarenita

Nombre Comercial: Piedra de Martes

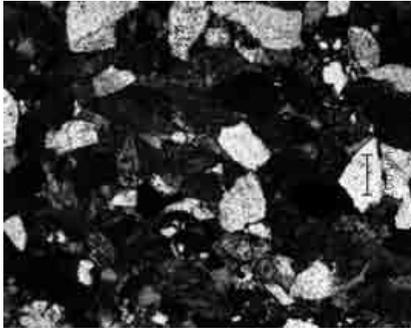
Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

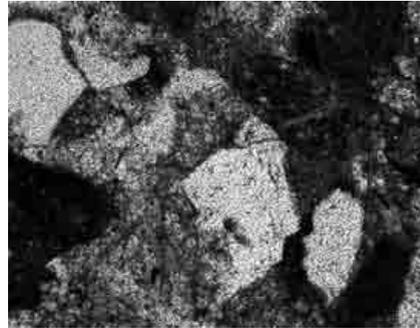
Petrográficamente, la "Piedra de Martes" se describe como una arenita, clasificada como Litoarenita-Sedarenita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto 82% está compuesto por fragmentos líticos 60% de tamaño medio 0,15 mm, clastos de cuarzo monocristalino y policristalinos 22% de tamaño medio 0,12 mm, feldespatos alterados <1% y filosilicatos primarios <1%; moscovita y clorita. Los fragmentos líticos son calcíticos (52,6%) micríticos, microesparíticos y esparíticos, dolomíticos (8,3%) y metamórficos (39,1%).

El cemento es calcítico esparítico intergranular 9% de tamaño medio 0,35 mm recreciendo a las partículas carbonatadas con continuidad cristalina, calcítico esparítico rellenando grietas de extensión 2,2% y dolomítico syntaxial 1%. Aparece una proporción significativa de matriz filosilicatada 4,5%. De modo adicional cabe destacar la presencia de opacos y partículas ferruginosas, así como de proporciones accesorias de turmalina y moscovita.

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

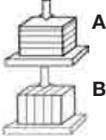
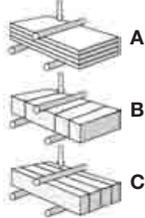
A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Se diferencian clastos de cuarzo y líticos carbonatados tanto calcíticos como dolomíticos. Escala 200 micras

B-B' (x10) Clastos de cuarzo subangulosos monocristalinos, fragmentos líticos calcíticos y microclina con macla en "enrejado" parcialmente alterada. Escala 100 micras

Los contactos entre los clastos constituyentes son predominantemente largos. Los clastos son mayoritariamente angulosos-subangulosos con un tamaño medio de 0,15 mm y un tamaño máximo de 0,8 mm. La roca está moderadamente bien seleccionada ($S_o = 1,7$).

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color gris azulado (Munsell: 5B 7/1) de aspecto granudo y tamaño de grano fino. No presenta macroporosidad apreciable ni tampoco discontinuidades abiertas. Tampoco se identifican componentes solubles o disgregables cuya disolución o desagregación pudiera afectar a la integridad de la roca. Presenta sulfuros distribuidos heterogéneamente de hasta 1 cm de diámetro.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación
Absorción	0,58%	0,02%	0,03
Densidad aparente	2640kg/m ³	39,9kg/m ³	0,01
Densidad real	2681kg/m ³	42,5kg/m ³	0,01
Porosidad abierta	1,53%	0,07%	0,05
Resistencia a la compresión	A 96Mpa	2,27Mpa	0,02
			
Resistencia a la flexión	A 22,1Mpa	0,79Mpa	0,09
	Tras heladicidad A 24,83Mpa	0,59Mpa	0,08
			
Resistencia al desgaste por abrasión A-estratificación perpendicular	20mm	0,68mm	0,03

Sigla: 3-En

Nombre Científico: Sedarenita

Nombre Comercial: Loseta Rústica, Piedra de Ena

Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra de Ena” se describe como una arenita, clasificada como Litoarenita-Sedarenita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto 90% está compuesto por fragmentos líticos 68%, clastos subangulosos de cuarzo monocristalino y policristalinos 15%, feldspatos parcialmente alterados 2%, filosilicatos 1% y opacos 5%. Los fragmentos líticos son carbonatados (70%) (principalmente calcíticos (policristalinos, monocristalinos y micríticos) y minoritariamente dolomíticos), metamórficos y filosilicatados.

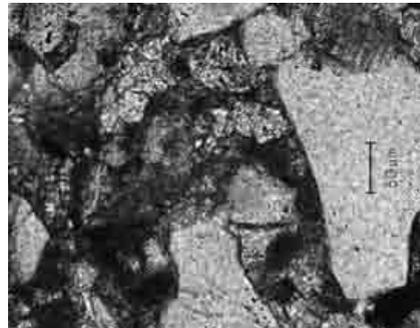
El cemento es calcítico esparítico intergranular en mosaico inequigranular y sintaxial 9% con contactos curvos y tamaño medio 0,1 mm. La matriz filosilicatada es escasa <1%.

Los contactos entre los clastos son predominantemente largos y curvos y, en menor proporción, cóncavo-convexos. Los clastos de cuarzo son mayoritariamente subangulosos con una esfericidad baja, un tamaño medio de 0,16 mm y un tamaño máximo de 0,5 mm, mientras que

Nícoles paralelos



A

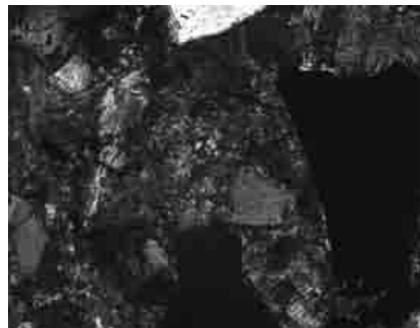


B

Nícoles cruzados



A'



B'

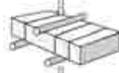
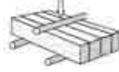
A-A' (x10) Aspecto general, zona teñida. Clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos cementados por calcita esparítica. Escala 100 micras

B-B' (x20) Clastos de cuarzo subangulosos con esfericidad baja, fragmentos líticos carbonatados y metamórficos cementados por calcita esparítica. Escala 50 micras

los líticos carbonatados y metamórficos son predominantemente subangulosos. En ambos casos, la esfericidad es baja y el tamaño medio es de 0,25 mm y 0,1 mm respectivamente. La roca presenta una selección buena ($S_o = 1,2-1,4$).

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color naranja amarillento oscuro (Munsell: 10YR 6/6) de aspecto granudo y tamaño de grano fino. No presenta discontinuidades ni porosidad significativa, así como tampoco se identifican macrofósiles.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,45%	0,08%	0,18	
Densidad aparente	2653kg/m ³	7,79kg/m ³	0,003	
Densidad real	2685kg/m ³	2,56kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	1,19%	0,214%	0,18	
Resistencia al deslizamiento	67	0,83	0,01	
Resistencia a la compresión				
 A	A	114,8Mpa	26,21Mpa	0,071
 B	B	116,9Mpa	19,70Mpa	0,052
				1,02
Resistencia a la flexión				
 A	A	25,09Mpa	1,56Mpa	0,06
 B	B	24,62Mpa	1,03Mpa	0,04
 C	C	25,30Mpa	1,87Mpa	0,07
				0,03
Tras heladicidad A		29,66Mpa	6,85Mpa	0,23
Tras heladicidad B		25,56Mpa	1,76Mpa	0,07
Tras heladicidad C		24,60Mpa	2,16Mpa	0,09
				0,19
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	24,5mm	2,88mm	0,12	
B- estratificación paralela	25mm	2,08mm	0,08	1,02

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,635	Isótropo
Resistencia flexión	0,771	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,146	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,696	Isótropo

Sigla: 4-Hu

Nombre Científico: Sedarenita

Nombre Comercial: Piedra Alto Aragón

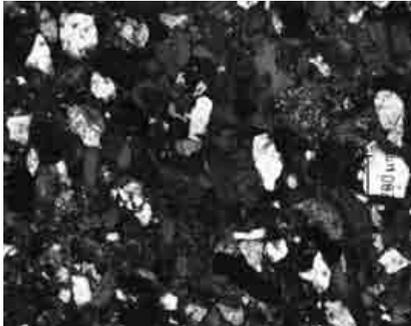
Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

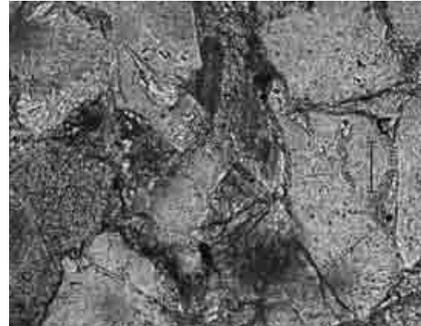
Petrográficamente, la "Piedra del Alto Aragón" se describe como una arenita, clasificada como Litoarenita-Sedarenita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto granosostenido 80% está compuesto por fragmentos de roca 57,5%, clastos de cuarzo monocristalino y policristalinos 13,9% de tamaño medio 0,25 mm y feldespatos alterados 5,2%. Los fragmentos líticos carbonatados son fragmentos fósiles e intraclastos calcíticos (63,5%) y dolomíticos (9,5%) de tamaño medio 0,20 mm y fragmentos de rocas metamórficas/volcánicas, en muchos casos, indistinguibles entre sí y por ello se describen conjuntamente (filitas/felsitas) de tamaño medio 0,18 mm (27%).

El cemento 18% es calcítico esparítico en ocasiones de calcita ferrosa con un tamaño medio de 0,25 mm y contactos irregulares. En una proporción del 1% hay cementos sintaxiales de cuarzo que interpretamos en todos los casos como heredados. La matriz es inferior al 2% y el

Nícoles paralelos



A

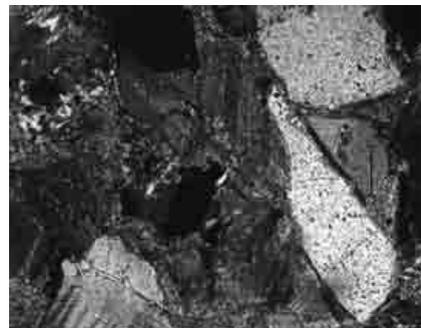


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Se diferencian clastos de cuarzo monocristalinos y policristalinos y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos

B-B' (x20) Clastos de cuarzo subangulosos, feldespatos parcialmente alterados y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos cementados por calcita esparítica

espacio poroso es inferior al 1%. Los feldespatos aparecen casi en su totalidad en un avanzado estado de alteración.

La morfología de los clastos es angulosa-subangulosa con un tamaño medio de 0,2 mm y un tamaño máximo de 0,8 mm. La selección es buena 1,2-1,4. La compactación es moderada con abundantes contactos de tipo puntual y largo. La ausencia de cantos aplastados indica una cementación relativamente temprana.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color gris oscuro medio (Munsell: N4) de aspecto granudo y tamaño de grano fino a medio. No presenta macroporosidad apreciable ni tampoco discontinuidades abiertas.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,34%	0,02%	0,07	
Densidad aparente	2679kg/m ³	2,95kg/m ³	0,001	
Densidad real	2703kg/m ³	2,51kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	0,90%	0,07%	0,07	
Resistencia al deslizamiento	57	1,09	0,02	
Resistencia a la compresión				
 A	A 112,6Mpa	24,00Mpa	0,06	
 B	B 105,7Mpa	29,81Mpa	0,09	1,07
Resistencia a la flexión				
 A	A 27,62Mpa	2,72Mpa	0,10	
 B	B 25,91Mpa	1,57Mpa	0,06	
 C	C 22,26Mpa	2,86Mpa	0,13	0,21
Tras heladicidad A	25,49Mpa	1,51Mpa	0,06	
Tras heladicidad B	27,03Mpa	0,95Mpa	0,04	
Tras heladicidad C	24,34Mpa	3,67Mpa	0,15	0,10
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	18mm	1,63mm	0,09	
B- estratificación paralela	19,5mm	0,52mm	0,03	1,08
Colorimetría	L* 62,2	a* -0,1	b* 0,5	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,19	Isótropo
Resistencia flexión	0,006	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,17	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,15	Isótropo

Sigla: 5-Pa

Nombre Científico: Filoarenita

Nombre Comercial: Piedra de Pueyo

Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

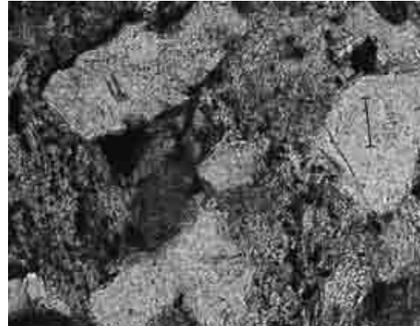
Petrográficamente, la "Piedra de Pueyo" se describe como una arenita, clasificada como Litoarenita-Filoarenita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto granosostenido 87,3% está compuesto por fragmentos líticos 56,1%, clastos de cuarzo monocristalino y policristalinos 30% de tamaño medio 0,18 mm, feldespatos alterados 3,2% de tamaño medio 0,09 mm y filosilicatos primarios (moscovita y clorita) 3%. Dentro de los fragmentos de roca los más abundantes son los líticos metamórficos (61,2%) tamaño medio 0,08 mm.

El cemento esparítico 4,4% presenta un tamaño medio de 0,1 mm, es de calcita ferrosa (95%) y accesorimente de dolomía ferrosa (5%). Aparece una proporción significativa 6,3% de matriz filossilicatada secundaria, generada a partir de la alteración de los feldespatos y filosilicatos. Como minerales de la fracción pesada, se identifican zircón, turmalina, glauconita y clinopiroxeno, totalizando menos del 1% de la roca.

Nícoles paralelos

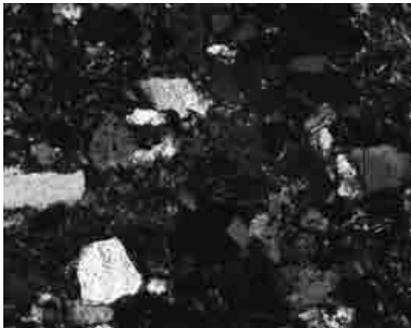


A

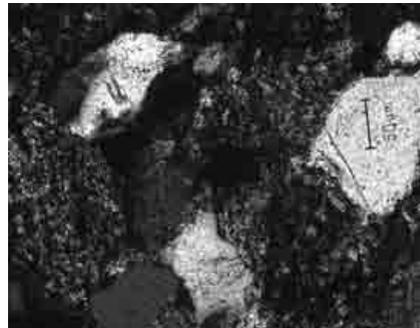


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x10) Aspecto general, zona teñida. Clastos de cuarzo, feldespatos parcialmente alterados, moscovitas y líticos carbonatados y metamórficos. Escala 100 micras

B-B' (x20) Clastos de cuarzo subangulosos y fragmentos de filitas/felsitas de tamaño variable. Escala 50 micras

Los contactos entre los clastos constituyentes son predominantemente largos y ocasionalmente suturados, presentándose los clastos blandos parcialmente aplastados. Los clastos son mayoritariamente subangulosos con un tamaño medio de 0,12 mm y un tamaño máximo de 0,35 mm. Presenta una selección buena, que varía entre 1,2-1,4.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca débilmente laminada de color gris oscuro (Munsell: N3) en corte fresco, pero que por oxidación superficial adopta una tonalidad gris oliva (Munsell: 5Y 4/1) de aspecto granudo y tamaño de grano fino. No presenta macroporosidad apreciable.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,52%	0,32%	0,21	
Densidad aparente	2549kg/m ³	37,52kg/m ³	0,01	
Densidad real	2651kg/m ³	18,93kg/m ³	0,007	
Porosidad abierta	3,86%	0,76%	0,20	
Resistencia al deslizamiento	65	0,40	0,006	
Resistencia a la compresión				
 A	A	102,3Mpa	29,43Mpa	0,09
 B	B	101,1Mpa	45,24Mpa	0,14
				1,01
Resistencia a la flexión				
 A	A	26,99Mpa	1,40Mpa	0,05
	B	27,48Mpa	0,91Mpa	0,03
	C	29,51Mpa	1,05Mpa	0,03
				0,09
 B	Tras heladicidad A	26,23Mpa	1,42Mpa	0,05
	Tras heladicidad B	25,75Mpa	0,60Mpa	0,02
	Tras heladicidad C	22,23Mpa	4,33Mpa	0,19
				0,16
 C				
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	21mm	1,28mm	0,06	
B- estratificación paralela	21mm	1,63mm	0,08	1,00

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,87	Isótropo
Resistencia flexión	0,0004	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,04	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,92	Isótropo

Sigla: 6-Un

Nombre Científico: Calcilita

Nombre Comercial: Piedra de Uncastillo

Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

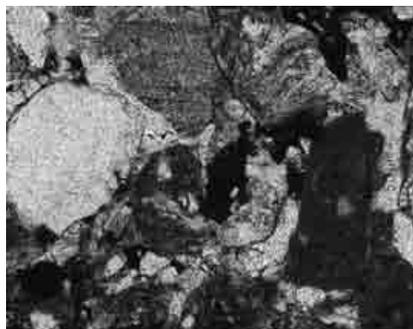
Petrográficamente, la “Piedra de Uncastillo” se describe como una arenita, clasificada como Calcilita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto granosostenido 69% está compuesto por fragmentos de roca 56,8%, cuarzo monocristalino y policristalinos 9,6% tamaño medio 0,25 mm y feldspatos 2,1% tamaño medio 0,18 mm, con diferentes estados de alteración. Como accesorios se encuentran óxidos de hierro, moscovita y fragmentos de rocas lútficas. Dentro de los fragmentos de roca se diferencian líticos carbonatados (policristalinos, monocristalinos y micríticos) tamaño medio 0,3 mm (62%) y metamórficos (38%) tamaño medio 0,25 mm. Los líticos carbonatados son, en su mayor parte, calcíticos y únicamente en un 2-5% dolomíticos.

El cemento 19% es mayoritariamente de calcita esparítica intergranular y sintaxial (90%) tamaño medio 0,16 mm y en menor proporción de cuarzo sintaxial (10%) con contactos pre-

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x10) Aspecto general, zona teñida. Clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos cementados por calcita esparítica. Escala 100 micras

B-B' (x20) Clastos de cuarzo y fragmentos líticos metamórficos y carbonatados de tamaño variable, cementados por calcita esparítica intergranular. Escala 50 micras

dominantemente curvos. La matriz filossilicada se presenta con porcentajes en torno al 2%. La porosidad abierta es del 10%.

La morfología de los clastos es subangulosa-subredondeada y presentan una esfericidad baja. El tamaño medio se sitúa en torno a los 0,25 mm alcanzando tamaños máximos de 1 mm. La selección es buena 1,1-1,2. La compactación es moderada con abundantes contactos de tipo largo y cóncavo-convexos.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca débilmente laminada de color marrón amarillento medio (Munsell: 10YR 5/4) de aspecto granudo y tamaño de grano medio. Es una roca porosa, con poros abundantes de tamaño milimétrico (2-4 mm). No presenta discontinuidades importantes.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	4,61%	0,608%	0,13	
Densidad aparente	2272kg/m ³	44,45kg/m ³	0,02	
Densidad real	2531kg/m ³	16,71kg/m ³	0,007	
Porosidad abierta	10,43%	1,182%	0,11	
Resistencia al deslizamiento	71	1,58	0,02	
Resistencia a la compresión				
 A	A 43,33Mpa	11,40Mpa	0,08	
 B	B 43,29Mpa	30,12Mpa	0,22	1,00
Resistencia a la flexión				
 A	A 3,24Mpa	0,46Mpa	0,14	
 B	B 3,10Mpa	0,26Mpa	0,08	
 C	C 3,01Mpa	0,19Mpa	0,06	0,07
Tras heladicidad A	3,88Mpa	1,96Mpa	0,50	
Tras heladicidad B	3,41Mpa	0,36Mpa	0,11	
Tras heladicidad C	4,97Mpa	0,27Mpa	0,05	0,38
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	31,5mm	4,22mm	0,13	
B- estratificación paralela	22,5mm	8,51mm	0,37	1,40
Colorimetría	L* 60,4	a* 3,4	b* 16,2	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,99	Isótropo
Resistencia flexión	0,39	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,09	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,05	Isótropo

Sigla: 7-Ay

Nombre Científico: Calclitita

Nombre Comercial: Piedra de Ayerbe

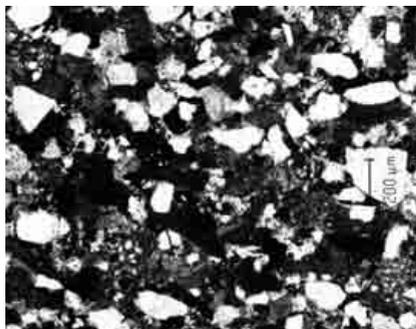
Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra de Ayerbe" se describe como una arenita, clasificada como Calclitita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto 69% está compuesto por fragmentos de roca 38% (carbonatados tamaño medio 0,2 mm policristalinos, monocristalinos y micríticos calcíticos (48%), dolomíticos (4%) y metamórficos (48%)), cuarzo 28% tamaño medio 0,25 mm (monocristalino y policristalinos) y feldspatos 3% con diferentes estados de alteración. La fracción pesada la componen granos aislados de zircón, esfena, turmalina y piroxeno, sumando menos del 1% de la roca.

La matriz, compuesta por filosilicatos, es poco abundante 1-3%, la porosidad abierta está distribuida homogéneamente en la roca y supone un 9% del volumen total de la roca y por último el cemento alcanza un 21% es carbonatado (95%) y de cuarzo sintaxial (5%) con un tama-

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados y filitas cementados por calcita esparítica. Escala 200 micras

B-B' (x20) Clastos de cuarzo con cemento sintaxial y fragmentos líticos metamórficos y carbonatados subangulosos, cementados por calcita esparítica. Escala 50 micras

ño medio de 0,16 mm. El cemento carbonatado esparítico que rodea sintaxialmente a los fragmentos líticos carbonatados es, en ocasiones, de calcita ferrosa.

La morfología de los clastos es subangulosa-subredondeada y presentan una esfericidad baja. El tamaño medio se sitúa en torno a los 0,25 mm alcanzando tamaños máximos de 0,7 mm. La selección es buena 1,2-1,4. La compactación es moderada con abundantes contactos de tipo largo y cóncavo-convexos.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color marrón amarillento medio (Munsell: 10YR 5/4) de aspecto granudo y tamaño de grano medio. Es una roca porosa, con poros abundantes de tamaño milimétrico (2-4mm). No presenta estructuras sedimentarias visibles ni tampoco microfósiles.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	5,73%	0,188%	0,03	
Densidad aparente	2208kg/m ³	9,76kg/m ³	0,004	
Densidad real	2524kg/m ³	10,74kg/m ³	0,004	
Porosidad abierta	12,63%	0,380%	0,03	
Resistencia al deslizamiento	70	2,07	0,03	
Resistencia a la compresión				
 A	A 40,6Mpa	15,59Mpa	0,12	
 B	B 31,1Mpa	9,15Mpa	0,09	1,31
Resistencia a la flexión				
 A	A 4,90Mpa	0,58Mpa	0,12	
 B	B 4,21Mpa	0,88Mpa	0,21	
 C	C 4,95Mpa	0,40Mpa	0,08	0,16
	Tras heladicidad A 6,08Mpa	0,34Mpa	0,06	
	Tras heladicidad B 3,60Mpa	0,40Mpa	0,11	
	Tras heladicidad C 5,24Mpa	0,16Mpa	0,03	0,50
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	42mm	2,49mm	0,06	
B- estratificación paralela	34mm	3,73mm	0,11	1,24
Colorimetría	L* 59,9	a* 3,6	b* 17,2	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,002	Anisótropo
Resistencia flexión	0,06	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	3,3E-09	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,001	Anisótropo

Sigla: 8-Tu

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Nombre Comercial: Piedra Campanil de Tudela

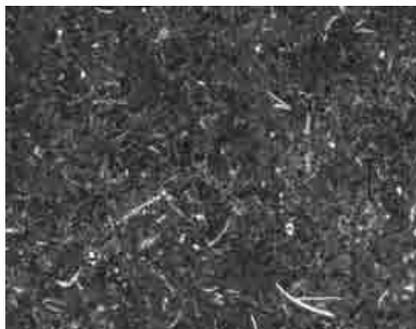
Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

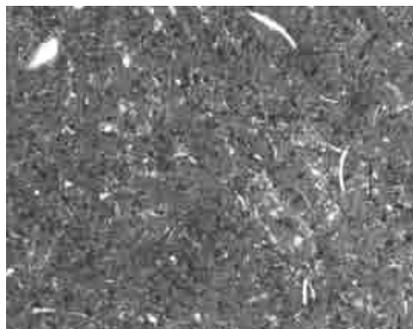
Petrográficamente, la "Piedra Campanil" se describe como una roca carbonatada clasificada como Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone Bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda soportada por la matriz calcítica que alcanza una proporción del 58%. La matriz tiene un aspecto heterogéneo con variaciones en el tamaño cristalino. Los bioclastos son de composición calcítica y se presentan en una proporción del 26% (50% bivalvos, 30% carofitas y 20% ostrácodos). El tamaño máximo de los bioclastos es de 1 mm y el tamaño medio es de 0,3 mm. Los bioclastos de mayor tamaño (bivalvos y carofitas) presentan una orientación preferente paralela a la estratificación. Como minerales detríticos aparecen pequeñas proporciones de cuarzo 2% y minerales de la arcilla.

Nícoles paralelos

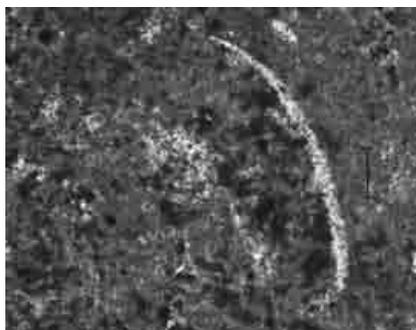


A

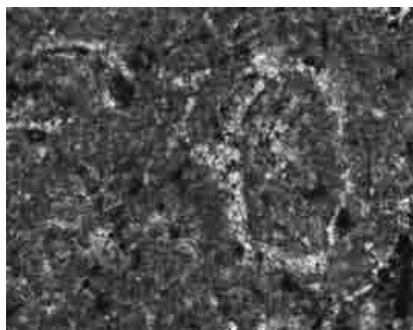


B

Nícoles cruzados



A'



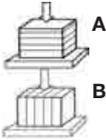
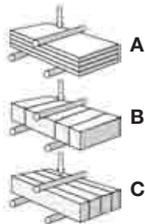
B'

A-B (x4) Aspecto general de la roca. Textura no granosoportada con bioclastos calcíticos (bivalvos y carofitas). Escala 200 micras. **A'-B' (x20)** Aspecto heterogéneo de la matriz con variaciones en el tamaño cristalino. Cemento calcítico esparítico en porosidad móldica de bivalvos (**A'**) y carofitas (**B'**). Escala 50 micras.

El cemento 3% es de calcita esparítica tamaño medio 0,08 mm, localizándose preferentemente en la porosidad móldica de los bioclastos. La porosidad abierta 10% es el resultado de bioturbaciones vegetales y porosidad de tipo móldico, con un tamaño medio de 0,2 mm. La compactación ha influido en la distribución de la porosidad existente quedando los macroporos aislados unos de otros. La roca presenta una selección de 1,2-1,4.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color blanco amarillento (Munsell: 5Y 9/1), homogénea, aunque ocasionalmente presenta niveles laminados por intercalaciones de capas margosas centimétricas. Puntualmente, aparece pirolusita dendriforme. Es una roca porosa, con abundantes poros de tamaño milimétrico (2-4 mm).

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación
Absorción	11,23%	0,405%	0,04
Densidad aparente	1959kg/m ³	79,11kg/m ³	0,04
Densidad real	2515kg/m ³	134,71kg/m ³	0,05
Porosidad abierta	22,02%	1,304%	0,06
Resistencia a la compresión	A 46,1Mpa	2,23Mpa	0,15
			
Resistencia a la flexión	A 6,10Mpa	0,21Mpa	0,11
			
Resistencia al desgaste por abrasión			
A- estratificación perpendicular	2,2mm	0,42mm	0,19

Sigla: 9-Fr

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Nombre Comercial: Piedra Campanil de Fraga

Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra Campanil" se describe como una roca carbonatada clasificada como Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda soportada por la matriz calcítica que alcanza una proporción del 70%. La matriz tiene un aspecto heterogéneo con variaciones en el tamaño cristalino que crean una laminación por cambios en la cristalización de la micrita. Los bioclastos son de composición calcítica y se presentan en una proporción del 12% (40% bivalvos, 40% carofitas y 20% ostrácodos). Como minerales detríticos aparecen pequeñas proporciones de cuarzo y minerales de la arcilla (1%).

El cemento 8% es calcítico esparítico intergranular, equigranular, con un tamaño medio de 50 micras y contactos planos y curvos entre sus cristales. La porosidad, relacionada princi-

Nícoles paralelos

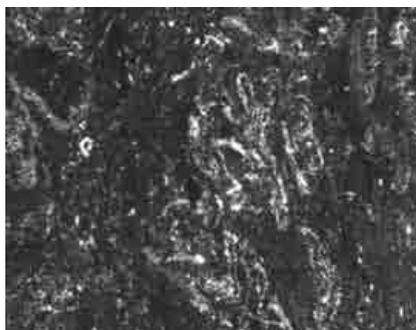


A

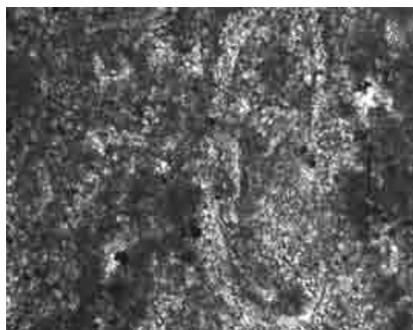


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca. Textura no granosoportada. La matriz presenta un aspecto heterogéneo con variaciones en su tamaño cristalino. Escala 200 micras.

B (x20) Laminación por cambios en la cristalización de la micrita. Escala 50 micras.

B' (x20) Fragmento de carofita. Escala 50 micras.

palmente con procesos de bioturbación por raíces, representa un 8% del volumen de la roca. La roca tiene una selección de 1,2-1,4.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color gris amarillento oscuro (Munsell: 5Y 7/1), bastante homogénea, ocasionalmente presenta niveles margosos centimétricos, laminaciones paralelas poco marcadas y nódulos de sílex. Es una roca porosa, con poros abundantes de tamaño milimétrico (2-5 mm). Le ha afectado una intensa bioturba-ción por raíces. La ausencia de fisuras es más marcada cuanto más potente es el estrato.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	6,99%	0,246%	0,03		
Densidad aparente	2167kg/m ³	37,58kg/m ³	0,02		
Densidad real	2558kg/m ³	6,03kg/m ³	0,004		
Porosidad abierta	15,20%	0,534%	0,03		
Resistencia al deslizamiento	67	2,12	0,03		
Resistencia a la compresión					
 A	A	52,2Mpa	27,57Mpa	0,16	
 B	B	53,1Mpa	28,33Mpa	0,17	1,02
Resistencia a la flexión					
 A	A	9,65Mpa	0,71Mpa	0,07	
 B	B	11,57Mpa	2,86Mpa	0,25	
 C	C	9,60Mpa	0,75Mpa	0,08	0,19
	Tras heladicidad A	9,04Mpa	0,91Mpa	0,10	
	Tras heladicidad B	12,02Mpa	1,13Mpa	0,09	
	Tras heladicidad C	2,79Mpa	0,33Mpa	0,12	1,16
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	21mm	1,49mm	0,07		
B- estratificación paralela	22mm	2,73mm	0,12	1,05	
Colorimetría	L* 80,5	a* 2,1	b* 8,6		

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,85	Isótropo
Resistencia flexión	0,12	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	3,4E-11	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,41	Isótropo

Sigla: 10-Az

Nombre Científico: Calcilita

Nombre Comercial: Piedra de Alcañiz

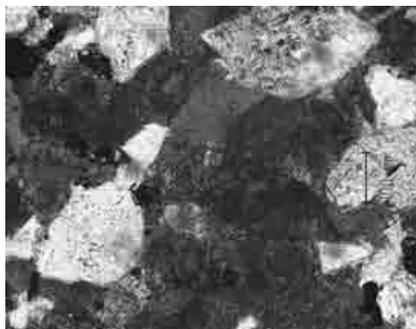
Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra de Alcañiz" se describe como una arenita, clasificada como Calcilita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto granosostenido 73% esta compuesto por fragmentos de roca 40,2% (carbonatados tamaño medio 0,3 mm tanto calcíticos (policristalinos, monocristalinos y micríticos) (74%) como dolomíticos (22%) y metamórficos (4%)), cuarzo 31,4% tamaño medio 0,25 mm (monocristalino y policristalinos) y feldespatos 1,4% con diferentes estados de alteración. Como elementos minoritarios pueden presentarse micas (mayoritariamente de tipo moscovita), turmalina, minerales clorítico-glaucóníticos y algún zircón.

El cemento 20% es carbonatado (89%) tamaño medio 0,2 mm con contactos predominantemente curvos, (29,78% sintaxial, 6,38% intrapartícula y 63,82% interpartícula) y de cuarzo sintaxial (11%). La matriz, compuesta por filosilicatos, es poco abundante 1-3%. La porosidad es del 5%.

Nícoles paralelos

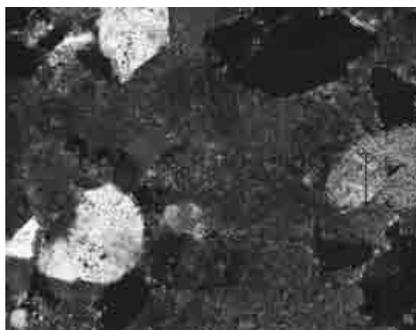


A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x10) Aspecto general de la roca, zona teñida. Clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados tanto calcíticos como dolomíticos cementados por calcita esparítica.

B-B' (x20) Fragmento lítico carbonatado con cemento calcítico sintaxial junto con clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados micríticos. Escala 50 micras.

La morfología de los clastos es subangulosa-subredondeada y presentan una esfericidad baja. El tamaño medio se sitúa en torno a los 0,3-0,35 mm alcanzando tamaños máximos de 0,9 mm. La selección es buena 1,2-1,4. La compactación es moderada con abundantes contactos de tipo largo y cóncavo-convexos.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca masiva de color marrón amarillento oscuro (Munsell: 10YR 6/4) de aspecto granudo y tamaño de grano medio. Es una roca porosa, con poros abundantes de tamaño milimétrico (2-4 mm). No presenta estructuras sedimentarias visibles ni tampoco macrofósiles.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	4,29%	0,065%	0,02	
Densidad aparente	2273kg/m ³	19,41kg/m ³	0,009	
Densidad real	2521kg/m ³	41,95kg/m ³	0,02	
Porosidad abierta	9,73%	0,140%	0,02	
Resistencia al deslizamiento	71	1,51	0,02	
Resistencia a la compresión				
 A	A 36,2Mpa	8,77Mpa	0,07	
 B	B 34,8Mpa	8,11Mpa	0,07	1,04
Resistencia a la flexión				
 A	A 4,61Mpa	0,26Mpa	0,06	
 B	B 4,30Mpa	0,13Mpa	0,03	
 C	C 6,35Mpa	0,71Mpa	0,11	0,40
Tras heladicidad A	5,32Mpa	0,85Mpa	0,16	
Tras heladicidad B	4,65Mpa	0,32Mpa	0,07	
Tras heladicidad C	6,61Mpa	0,32Mpa	0,05	0,35
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	19mm	1,74mm	0,09	
B- estratificación paralela	20,5mm	4,12mm	0,20	1,08
Colorimetría	L* 67,2	a* 5,2	b* 19,2	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,37	Isótropo
Resistencia flexión	1,2E-06	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	7,5E-05	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,37	Isótropo

Sigla: 11-Ta

Nombre Científico: Grauvaca lítica

Nombre Comercial: Laja de Tabuena

Uso Constructivo: Lajas

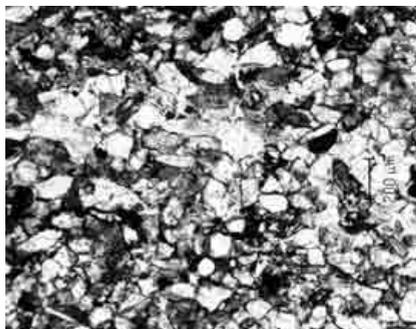
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Laja de Tabuena” se describe como una arenita, clasificada como Grauvaca lítica (Pettijohn, 1987), de textura granosostenida. El esqueleto granosostenido 72% está compuesto por granos de cuarzo monocristalino y policristalinos (53%), fragmentos líticos transformados mayoritariamente a matriz filosilicatada secundaria (17%) y feldespato (10%). Se identifican también moscovita 5% y biotita 4%. Los feldespatos aparecen casi en su totalidad en un avanzado estado de alteración.

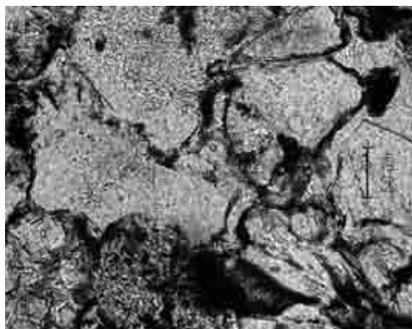
El cemento es silíceo 2% de tipo sintaxial. En conjunto se trata de una roca poco porosa y con discontinuidades escasas, rellenas por cemento de cuarzo, con espesor submilimétrico y la matriz 16% es filosilicatada.

La morfología de los clastos de cuarzo es subangulosa con una esfericidad baja y un tamaño medio de 0,35 mm, mientras que los clastos de feldespatos son subredondeados con tama-

Nícoles paralelos



A

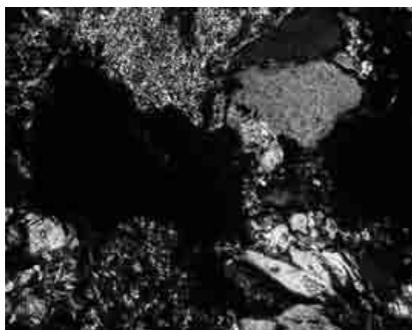


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Se diferencian clastos de cuarzo, principalmente monocristalinos, feldespatos y filosilicatos. Escala 200 micras.

B-B' (x20) Clastos de cuarzo con cemento sintaxial junto con fragmentos líticos y filosilicatos. Escala 50 micras.

ño medio de 0,25 mm. La selección es buena 1,2-1,4. La compactación es intensa con abundantes contactos de tipo largo y cóncavo-convexos.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente es una roca de color marrón rojizo oscuro (Munsell: 10R 3/4) de aspecto granudo y tamaño de grano fino a medio. Su estructura sedimentaria más significativa es la laminación paralela. Es una roca microporosa.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,02%	0,078%	0,08	
Densidad aparente	2585kg/m ³	17,33kg/m ³	0,007	
Densidad real	2654kg/m ³	13,27kg/m ³	0,005	
Porosidad abierta	2,63%	0,187%	0,07	
Resistencia al deslizamiento	64	1,52	0,02	
Planeidad	2,63mm	1,26mm	0,48	
Resistencia a la compresión				
 A	A 88,5Mpa	76,23Mpa	0,27	
 B	B 89,0Mpa	17,73Mpa	0,07	1,01
Resistencia a la flexión				
 A	A 18,11Mpa	1,22Mpa	0,07	
 B	Tras heladicidad A 16,36Mpa	1,46Mpa	0,09	
 C				
Resistencia al desgaste por abrasión A- estratificación perpendicular	22mm	3,08mm	0,14	
Colorimetría	L* 59,9	a* 7,3	b* 11,3	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,96	Isótropo

Sigla: 12-Ca

Nombre Científico: Biopelmicrita-Packstone de peloides y pelecípodos

Nombre Comercial: Mármol Negro Calatorao

Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, el “Mármol Negro Calatorao” se describe como una roca carbonatada de grano fino clasificada como una Biopelmicrita según la clasificación de Folk (1962) o Packstone de peloides y pelecípodos según la clasificación de Dunham.

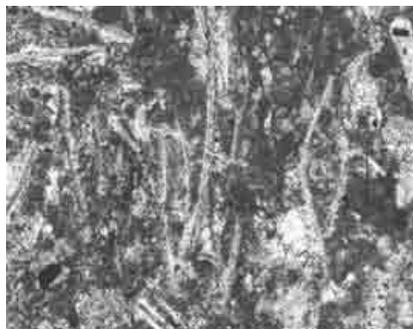
Presenta una textura granuda sostenida por la matriz o granosostenida en función del nivel caracterizado. Tiene una bioturbación intensa de pequeña escala que borra parcialmente la laminación original. Los aloquímicos encontrados corresponden a granos esqueléticos con tamaños de 20-80 micras (pelecípodos del género *Bositra* Buchi, placas de crinoides y foraminíferos) y peloides de 20 a 100 micras de diámetro. El cuarzo detrítico y los minerales opacos son minoritarios 1-2%, junto con moscovita muy escasa. La roca presenta un cemento de calcita esparítica del 4%, dispuesto en posición intergranular y sellando la porosidad de fractura y móldica.

Las tres variedades comerciales de la caliza de Calatorao presentan una composición petrográfica similar en la que únicamente aparecen variaciones en el porcentaje de matriz, peloides

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



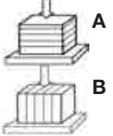
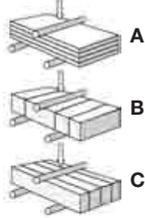
B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca. La porosidad de fractura está sellada por cemento de calcita esparítica. **B (x10)-B' (x20)** Aspecto heterogéneo de la matriz con variación en su tamaño de grano. **B** Laminación por orientación de los pelecípodos. **B'** Cemento de calcita esparítica en la porosidad móldica de los pelecípodos.

y bioclastos, que en conjunto representan más del 95% de los componentes de la roca. La variedad de caliza de Calatorao Ca1 tiene una proporción de 39% de granos esqueléticos, 32% de matriz y 29% de peloides. La variedad Ca2 presenta un 49% de bioclastos, un 38% de matriz y un 13% de peloides. Finalmente, en la variedad Ca3 se encuentra un 38% de matriz, 34% de bioclastos y 28% de peloides.

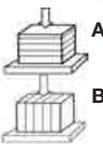
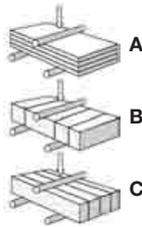
Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, microcrista-lino, de color gris oscuro (Munsell: N3) y tamaño de grano fino. Presenta una intensa bioturbación, los microfósiles son escasos y frecuentemente se encuentran reemplazados por calcita. Las principales discontinuidades son vénulas de espesor submilimétrico rellenas por calcita y estilolitos.

Sigla: 12-Ca1 Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	0,39%	0,061%	0,16		
Densidad aparente	2656kg/m ³	6,58kg/m ³	0,002		
Densidad real	2683kg/m ³	3,40kg/m ³	0,001		
Porosidad abierta	1,03%	0,167%	0,20		
Resistencia al desgaste por rozamiento	3,44mm	0,96mm	0,28		
Resistencia a la compresión					
	A	102Mpa	31,55Mpa	0,09	
	B	95,4Mpa	48,34Mpa	0,16	1,07
Resistencia a la flexión					
	A	23,04Mpa	3,30Mpa	0,14	
	B	9,24Mpa	4,68Mpa	0,51	
	C	23,38Mpa	2,92Mpa	0,12	0,76
	Tras heladicidad A	27,44Mpa	3,05Mpa	0,11	
	Tras heladicidad B	12,86Mpa	5,42Mpa	0,42	
	Tras heladicidad C	26,49Mpa	3,84Mpa	0,14	0,65
Resistencia al choque					
A- estratificación perpendicular	33cm	9,54cm	0,40		
B- estratificación paralela	38cm	12,74cm	0,48	1,08	
Microdureza Knoop					
A- estratificación perpendicular	1001,5Mpa	0,57Mpa	0,0005		
B- estratificación paralela	1482,1Mpa	0,95Mpa	0,0006	1,48	
Colorimetría	L* 37,0	a* 1,0	b* 1,5		

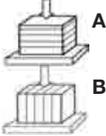
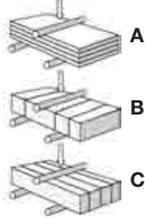
Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,39	Isótropo
Resistencia flexión	1,8E-05	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	3,1E-05	Anisótropo
Microdureza Knoop	8,0E-27	Anisótropo
Resistencia al choque	0,61	Isótropo

Sigla: 12-Ca2 Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	0,31%	0,063%	0,21		
Densidad aparente	2660kg/m ³	3,69kg/m ³	0,002		
Densidad real	2684kg/m ³	3,51kg/m ³	0,001		
Porosidad abierta	0,82%	0,167%	0,20		
Resistencia al desgaste por rozamiento	3,37mm	0,890mm	0,26		
Resistencia a la compresión					
	A	86,3Mpa	41,23Mpa	0,15	
	B	95,3Mpa	33,94Mpa	0,11	1,11
Resistencia a la flexión					
	A	18,92Mpa	1,21Mpa	0,06	
	B	20,02Mpa	1,57Mpa	0,08	
	C	29,61Mpa	2,57Mpa	0,09	0,47
	Tras heladicidad A	19,91Mpa	5,84Mpa	0,29	
	Tras heladicidad B	21,29Mpa	2,12Mpa	0,09	
	Tras heladicidad C	26,01Mpa	4,34Mpa	0,17	0,27
Resistencia al choque					
A- estratificación perpendicular	39cm	14,62cm	0,54		
B- estratificación paralela	26cm	3,72cm	0,16	1,17	
Microdureza Knoop					
A- estratificación perpendicular	952,4Mpa	0,25Mpa	0,0002		
B- estratificación paralela	812,6Mpa	0,47Mpa	0,0005	1,17	
Colorimetría	L* 37,0	a* 1,0	b* 1,5		

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,2	Isótropo
Resistencia flexión	8,0E-08	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,07	Isótropo
Microdureza Knoop	1,1E-24	Anisótropo
Resistencia al choque	0,31	Isótropo

Sigla: 12-Ca3 Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,27%	0,095%	0,35	
Densidad aparente	2652kg/m ³	12,58kg/m ³	0,005	
Densidad real	2671kg/m ³	8,32kg/m ³	0,003	
Porosidad abierta	0,72%	0,248%	0,34	
Resistencia al desgaste por rozamiento	2,53mm	0,42mm	0,18	
Resistencia a la compresión				
	A	99,4Mpa	51,06Mpa	0,16
	B	91,8Mpa	49,82Mpa	0,17
Resistencia a la flexión				
	A	20,79Mpa	2,83Mpa	0,14
	Tras heladicidad A	17,58Mpa	3,20Mpa	0,18
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	31cm	7,28cm	0,28	
B- estratificación paralela	29cm	6,78cm	0,28	1,08
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	565,7Mpa	0,17Mpa	0,0003	
B- estratificación paralela	663,2Mpa	0,15Mpa	0,0001	1,17
Colorimetría	L* 37,0	a* 1,0	b* 1,5	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,42	Isótropo
Microdureza Knoop	9,9E-17	Anisótropo
Resistencia al choque	0,71	Isótropo

Sigla: 13-Pu

Nombre Científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides

Nombre Comercial: Amarillo Puebla de Albornón

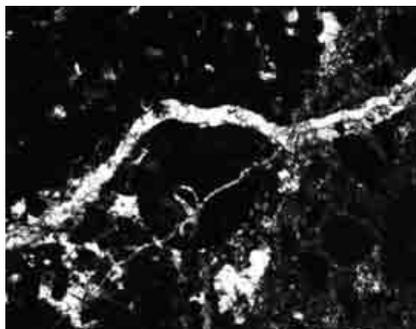
Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la Piedra "Amarillo Puebla de Albornón" se describe como una roca carbonatada clasificada como Biopelmicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone de bioclastos y peloides según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura clásica no granosoportada. Está compuesta principalmente por micrita 40%, peloides 20%, ooides 10% y bioclastos 10%. El tamaño medio de los bioclastos es de 0,3 mm y consisten fundamentalmente en foraminíferos (miliólidos 50%), microfilamentos de braquiópodos (30%), gasterópodos (10%), placas de equinodermo (5%) y bivalvos (5%). Completan la asociación mineral, escaso cuarzo y minerales opacos (< 1%). Las zonas bioturbadas (Talassinoides) se componen mayoritariamente de micrita con algunos ooides (mudstone-wackstone). La matriz ha sufrido una recristalización a microesparita y esparita, especialmente en las zonas bioturbadas.

Nícoles paralelos



A

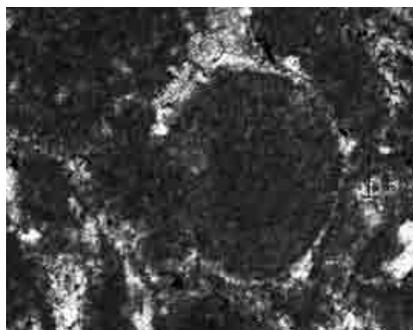


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A(x4) Porosidad de fractura sellada por cemento calcítico esparítico. La parte derecha de la foto corresponde a las galerías de bioturbación (microesparita dolomítica). Escala 200 micras.

A'(x20) Zona teñida, galerías de bioturbación. **B(x10)** Fragmentos de foraminíferos y ooides. Escala 100 micras. **B' (x20)** Ooide. Escala 50 micras.

La esparita calcítica 8% ocupa poros primarios del sedimento y algunas grietas, en tanto que en las galerías de bioturbación se identifica una microesparita de dolomita ferrosa 10%, con contactos predominantemente de tipo planar y curvos. La calcita esparítica presenta un tamaño medio de 0,3 mm. La roca presenta una selección de 1,4-2.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color hetero-géneo, las galerías de bioturbación (Talassinoides) presentan un color gris amarillento a rojizo (Munsell: 5YR 7/4 a 10YR 7/4) en general más claro que la matriz amarillenta de la roca (Munsell: 10YR 6/2). Son frecuentes las grietas de espesor submilimétrico, selladas por calcita y los estilolitos. Ocasionalmente se identifican geodas de hasta 4 cm de diámetro.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,01%	0,138%	0,14	
Densidad aparente	2636kg/m ³	14,15kg/m ³	0,005	
Densidad real	2695kg/m ³	5,31kg/m ³	0,002	
Porosidad abierta	2,66%	0,349%	0,13	
Resistencia al desgaste por rozamiento	3mm	0,55mm	0,18	
Resistencia a la compresión				
 A	A	99,3 Mpa	66,87Mpa	0,21
 B	B	102,1Mpa	58,58Mpa	0,18
				1,03
Resistencia a la flexión				
 A	A	24,64Mpa	2,50Mpa	0,10
 B	B	19,89Mpa	3,42Mpa	0,17
 C	C	18,90Mpa	2,44Mpa	0,13
				0,27
	Tras heladicidad A	26,77Mpa	1,41Mpa	0,05
	Tras heladicidad B	21,96Mpa	3,87Mpa	0,18
	Tras heladicidad C	21,91Mpa	2,26Mpa	0,10
				0,21
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	31cm	8,21cm	0,34	
B- estratificación paralela	31cm	10,66cm	0,49	1,09
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	1289,3Mpa	0,26Mpa	0,0002	
B- estratificación paralela	1073,0Mpa	0,59Mpa	0,0005	1,20
Colorimetría				
	L* 57,6	a* 8,0	b* 21,3	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,81	Isótropo
Resistencia flexión	0,007	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,01	Anisótropo
Microdureza Knoop	1,0E-25	Anisótropo
Resistencia al choque	0,63	Isótropo

Sigla: 14-AI

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Nombre Comercial: Oro Viejo, Antigua

Uso Constructivo: Cantería y lajas

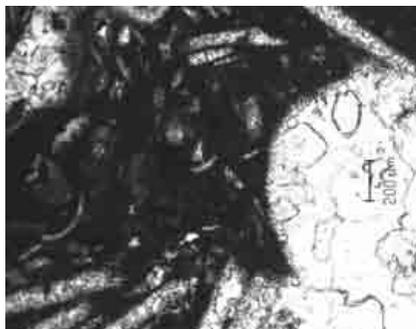
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra de Alacón” se describe como una roca carbonatada de grano medio-grueso clasificada como una Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

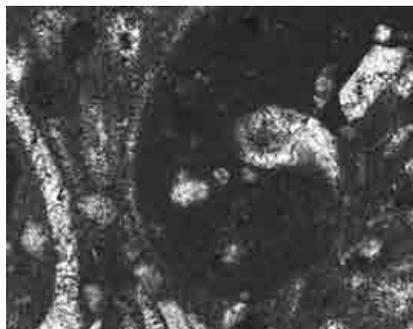
La roca presenta una textura granuda no granosostenida y su esqueleto está compuesto mayoritariamente por bioclastos 43% de hasta 3 mm de longitud y, en menor proporción, por intraclastos 4%. Los bioclastos presentes son: gasterópodos (45%) con un tamaño medio de 0,8 mm, bivalvos (35%) con un tamaño medio de 1 mm, braquiópodos (15%) y placas de crinoide (5%). El mineral detrítico principal es el cuarzo 1% y también aparecen opacos 2% parcialmente oxidados, generando una ferruginización en su entorno.

Presenta un elevado porcentaje de matriz micrítica 30% caracterizada por un tamaño de grano heterogéneo. La calcita esparítica 20%, de tamaño medio 150 micras, se dispone en

Nícoles paralelos

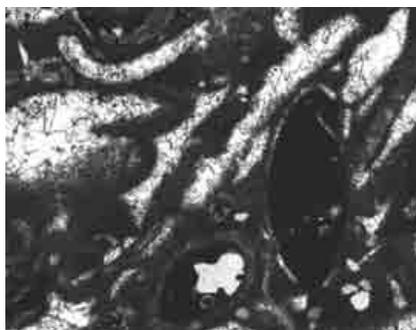


A

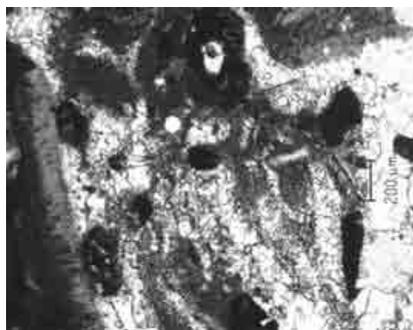


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca. Contacto entre zonas micríticas y esparíticas.

A' (x10) Braquiópodos. Escala 200 micras. **B (x10)** Fragmentos de bioclastos (gasterópodos y bivalvos) con mosaicos de calcita micrítica en la porosidad móldica, englobados en una matriz de tamaño heterogéneo. **B' (x4)** Zonas con predominio de esparita frente a matriz.

mosaicos drúsicos en la porosidad móldica, ocupando parte del espacio intergranular y en la porosidad de fractura, resultando en conjunto una roca poco porosa 2%.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color hetero-géneo de marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 6/2) a marrón rojizo (10R 4/6) y tamaño de grano medio. Las principales discontinuidades que presenta son grietas de espesor milimétrico sin relleno o con relleno parcial de material margoso. Es una roca porosa, con poros de tamaño milimétrico y fósiles de hasta 3 mm. Presenta sulfuros parcialmente oxidados.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	0,43%	0,214%	0,50		
Densidad aparente	2644kg/m ³	19,19kg/m ³	0,007		
Densidad real	2675kg/m ³	7,76kg/m ³	0,003		
Porosidad abierta	1,12%	0,553%	0,49		
Resistencia al deslizamiento	59	1,30	0,02		
Planeidad	17,58mm	3,24mm	0,18		
Resistencia a la compresión					
 A	A	58,8Mpa	53,78Mpa	0,29	
	B	60Mpa	17,85Mpa	0,09	1,02
Resistencia a la flexión					
 A	A	13,74Mpa	3,26Mpa	0,24	
	B	13,35Mpa	3,69Mpa	0,28	0,14
	C	15,27Mpa	2,78Mpa	0,18	
 B	Tras heladicidad A	15,74Mpa	2,33Mpa	0,15	
	Tras heladicidad C	15,32Mpa	0,64Mpa	0,04	0,03
 C					
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	24mm	1,53mm	0,06		
B- estratificación paralela	24mm	0,76mm	0,32	1,00	
Colorimetría	L* 70,3	a* 6,0	b* 22,9		

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,88	Isótropo
Resistencia flexión	0,57	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,68	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,64	Isótropo

Sigla: 15-Ce

Nombre Científico: Sparstone

Nombre Comercial: Fósil Blanca

Uso Constructivo: Lajas

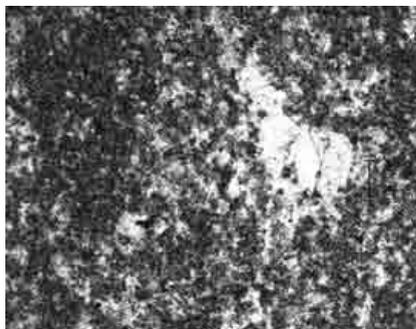
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra Fósil blanca” se describe como una roca carbonatada recristalizada clasificada como un Sparstone (Wright, 1992), cuya textura original no es reconocible.

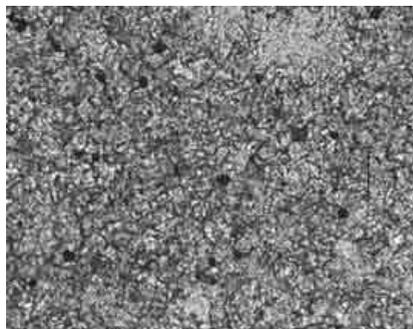
La roca presenta textura cristalina, la matriz recristalizada a microesparita representa un porcentaje del 70% y está compuesta por un mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares. El tamaño máximo de los cristales es de 25 micras y el tamaño medio es de 15 micras. La calcita esparítica 25% tiene un tamaño medio de 190 micras y se dispone en la porosidad secundaria con contactos predominantemente rectos y, en menor proporción, curvos.

La porosidad abierta es del 5% y presenta un tamaño medio de poro de 0,1 mm.

Nícoles paralelos

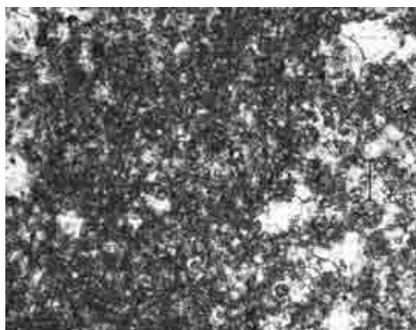


A

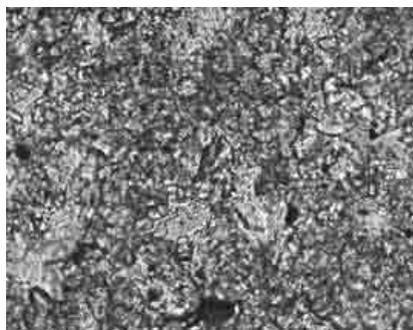


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura cristalina. Contacto entre zonas microesparíticas y esparíticas. Escala 200 micras.

B-B' (x20) Microesparita calcítica formando un mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares. Escala 50 micras.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto cristalino de color heterogéneo, presentando dos tonalidades mezcladas: marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 6/2) y naranja grisáceo (Munsell: 10YR 7/4) y tamaño de grano fino. Las principales discontinuidades encontradas son una laminación tenue de escala milimétrica y la frecuente presencia de macroporos y geodas de hasta 6 cm de diámetro.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,14%	0,797%	0,70	
Densidad aparente	2580kg/m ³	84,96kg/m ³	0,03	
Densidad real	2656kg/m ³	36,52kg/m ³	0,01	
Porosidad abierta	2,88%	1,895%	0,66	
Resistencia al deslizamiento	57	0,84	0,01	
Planeidad	7,29mm	2,36mm	0,32	
Resistencia a la compresión				
 A	A	38,5Mpa	29,98Mpa	0,24
 B	B	72,8Mpa	42,31Mpa	0,18
Resistencia a la flexión				
 A	A	31,00Mpa	10,24Mpa	0,33
 B	B	9,21Mpa	1,10Mpa	0,12
 C	C	12,38Mpa	5,40Mpa	0,44
Tras heladicidad A		24,99Mpa	0,413Mpa	0,02
Tras heladicidad C		16,93Mpa	2,02Mpa	0,12
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	27,5mm	1,85mm	0,07	
B- estratificación paralela	25,5mm	1,11mm	0,04	1,08

Descripción de Visu:

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,0004	Anisótropa
Resistencia flexión	0,052	Isótropa
Resistencia flexión tras heladicidad	0,046	Anisótropa
Resistencia al desgaste por abrasión	0,047	Anisótropa

Sigla: 16-VI-I

Nombre Científico: Sparstone

Nombre Comercial: Crema Maestrazgo

Uso Constructivo: Ornamental

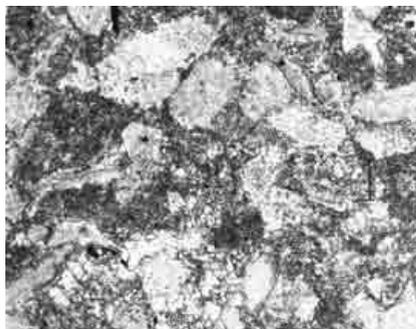
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la piedra “Crema Maestrazgo” se describe como una caliza recristalizada de composición calcítica en su totalidad, clasificada como un Sparstone (Wright 1992).

La roca posee una textura cristalina, compuesta por cristales subidiomorfos inequigranulares de calcita microesparítica 45% de tamaño medio 25 micras y calcita esparítica 50% en la que se identifican restos de la textura primaria. El tamaño medio de la esparita es de 0,2 mm, los cristales son predominantemente subeuhedrales y el límite entre los cristales es, en su mayoría, de tipo recto y curvo. Los opacos son escasos (menos de 1%).

La porosidad de la roca es del 5%, presentando un amplio rango de tamaños de poro, desde unas micras hasta varios milímetros y con un diámetro medio de 1 mm.

Nícoles paralelos

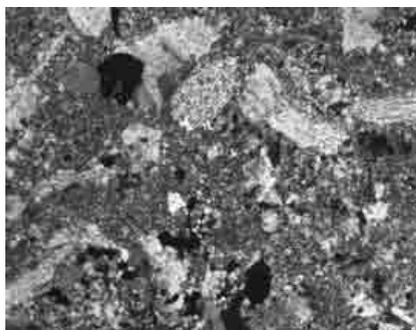


A

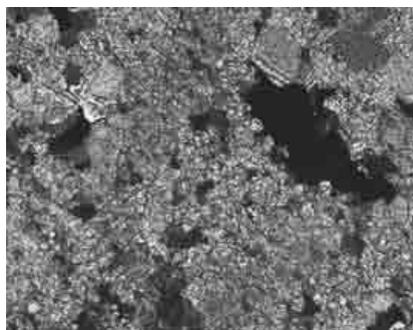


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura cristalina. Se observan cristales heterométricos de microesparita y esparita, ambas calcíticas. Escala 200 micras.

B-B' (x20) Detalle de la porosidad abierta de la roca y de la microesparita calcítica formando un mosaico de cristales subidiomorfos inequigranulares. Escala 50 micras.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, cristalino y color gris amarillento pálido (Munsell: 5Y 9/1). Es una roca muy homogénea, coherente y con poros abiertos de hasta 3 mm de diámetro. Las principales discontinuidades que presenta son pequeñas fracturas sub-milimétricas.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,87%	0,278%	0,15	
Densidad aparente	2417kg/m ³	30,02kg/m ³	0,01	
Densidad real	2537kg/m ³	15,70kg/m ³	0,006	
Porosidad abierta	4,51%	0,624%	0,14	
Resistencia al desgaste por rozamiento	3,26mm	0,12mm	0,04	
Resistencia a la compresión				
 A	A	43,0Mpa	38,41Mpa	0,28
 B	B	46,4Mpa	33,41Mpa	0,23
				1,08
Resistencia a la flexión				
 A	A	9,55Mpa	0,91Mpa	0,09
 B	B	10,12Mpa	1,72Mpa	0,17
 C	C	10,32Mpa	1,32Mpa	0,13
				0,08
Tras heladicidad A	A	7,55Mpa	0,64Mpa	0,08
Tras heladicidad B	B	6,66Mpa	1,18Mpa	0,18
Tras heladicidad C	C	8,59Mpa	0,95Mpa	0,11
				0,25
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	26cm	8,83cm	0,48	
B- estratificación paralela	30cm	11,01cm	0,55	1,11
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	753,9Mpa	0,42Mpa	0,0005	
B- estratificación paralela	800,3Mpa	0,43Mpa	0,0005	1,06
Colorimetría	L* 86,7	a* 1,6	b* 10,6	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,62	Isótropo
Resistencia flexión	0,51	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,01	Anisótropo
Microdureza Knoop	2,8E-19	Anisótropo
Resistencia al choque	0,67	Isótropo

Sigla: 17-CFI, 17-CFS

Nombre Científico: Sparstone

Nombre Comercial: Crema Fósil Inferior-Crema Fósil Superior

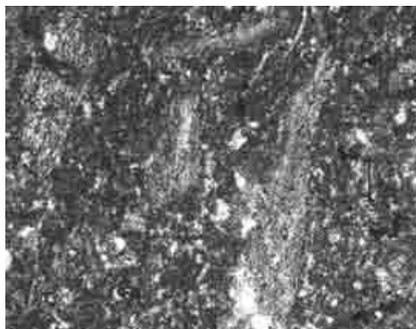
Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

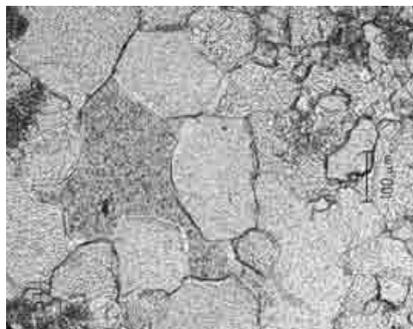
Petrográficamente, las piedras "Crema Fósil" se describen como rocas carbonatadas recristalizadas clasificadas como Sparstone (Wright, 1992). En estas rocas únicamente se conservan grandes fragmentos de ostrácodos como relictos de la textura original.

Estas rocas presentan una textura cristalina, la matriz recristalizada de micrita a microesparita representa un 63% en 17-CFI y un 38% en 17-CFS. Está compuesta por un mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares de tamaño medio 15 micras. La calcita esparítica 15% en 17-CFI y 37% en 17-CFS se dispone en mosaicos de tipo drúsico en la porosidad secundaria y los cristales presentan contactos planares y curvos en porcentajes similares. El tamaño medio de estos cristales es de 0,09 mm en el caso de 17-CFI y 0,125 mm en el caso de 17-CFS. En ambas rocas, el tamaño máximo es de 0,5 mm. Los fósiles presentes, ostrácodos 12-14%, alcanzan tamaños máximos de 3 mm.

Nícoles paralelos

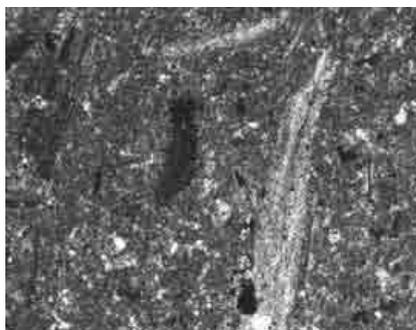


A

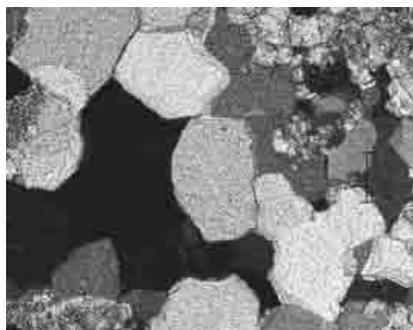


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura cristalina. Se observan cristales heterométricos de microesparita con restos de fragmentos de ostrácodos. Escala 200 micras.

B-B' (x10) Cemento de calcita esparítica dispuesta en mosaico drúsico tapizando parcialmente la porosidad secundaria. Escala 100 micras.

La porosidad secundaria del material es elevada 8% en 17-CFI y 10% en 17-CFS y se localiza en posición intercrystalina e intracrystalina. La distribución de tamaños de poro abarca desde unas micras hasta varios milímetros.

Sigla: 17-CFI,

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, microcristalino de color blanco (Munsell: N9). Es una roca relativamente homogénea, macroporosa, con poros abiertos de hasta 1,5 cm de diámetro y coherente. Presenta fósiles recristalizados de mineralogía calcítica de hasta 1,3 cm de longitud y vénulas de diferente grosor desde submilimétricas a centimétricas, de calcita esparítica en general de color blanco y dispuestas subparalelas a la estratificación.

Sigla: 17-CFI		Desviación	Coef.
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación
Absorción	3,62%	0,485%	0,135
Densidad aparente	2365kg/m ³	30,58kg/m ³	0,013
Densidad real	2586kg/m ³	8,80kg/m ³	0,003
Porosidad abierta	8,54%	1,030%	0,122
Colorimetría	L* 90,0	a* 1,3	b* 6,7

Sigla: 17-CFIS

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, cristalino de color blanco (Munsell: N9). Es una roca relativamente homogénea, macroporosa, con poros abiertos de hasta 1,5 cm de diámetro y coherente. Presenta fósiles recristalizados de mineralogía calcítica de hasta 1,3 cm de longitud. Se diferencia de la variedad CFI por la ausencia de venulas y por el mayor tamaño de los cristales de calcita.

Sigla: 17-CFI		Desviación	Coef.
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación
Absorción	1,30%	0,272%	0,21
Densidad aparente	2515kg/m ³	22,08kg/m ³	0,009
Densidad real	2600kg/m ³	8,01kg/m ³	0,003
Porosidad abierta	3,26%	0,659%	0,21

Sigla: 18-VI-II

Nombre Científico: Caliza Travertínica recristalizada-Sparstone

Nombre Comercial: Travertino Nogal Montoro

Uso Constructivo: Ornamental

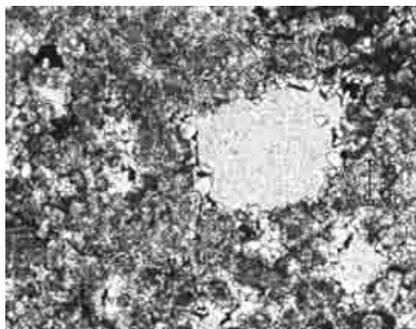
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la piedra "Travertino Nogal Montoro" se describe como una caliza travertínica recristalizada de composición calcítica en su totalidad, y se clasifica como un Sparstone (Wright 1992).

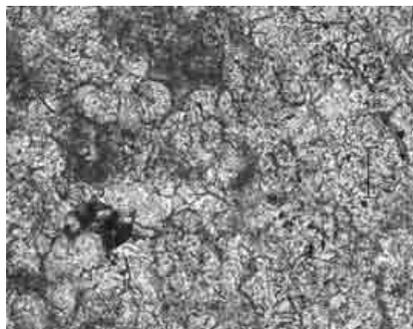
La roca está compuesta por micrita 7%, microesparita 40% y esparita 30-35% calcíticas. La microesparita y la esparita presentan un tamaño de cristal heterogéneo, siendo el tamaño medio de 10-15 micras y de 60-70 micras respectivamente. Los cristales de esparita de mayor tamaño se caracterizan por tener bordes cristalinos irregulares y se localizan tapizando parcialmente la porosidad de la roca.

La roca posee una porosidad elevada, del orden del 15-20%, con poros que presentan un amplio rango de tamaños (desde unas micras hasta 3 mm).

Nícoles paralelos

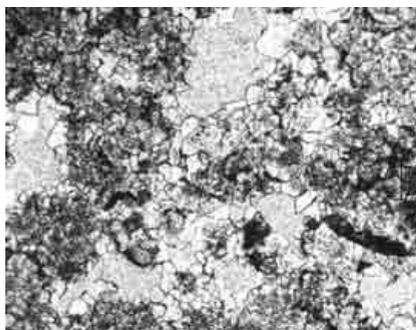


A

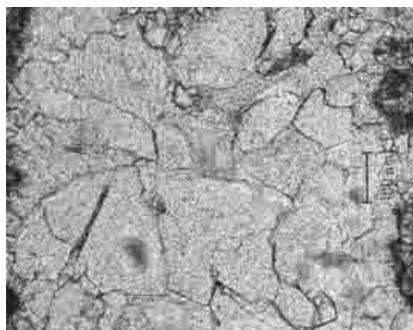


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura cristalina. Cristales heterométricos de micrita y microesparita y poros con un amplio rango de tamaños. Escala 200 micras.

B (x20) Microesparita calcítica formando un mosaico de cristales subidiomorfos inequigranulares. Escala 50 micras. **B' (x10)** Mosaico drúscico de esparita calcítica.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, microcristalino, oqueroso de color marrón pálido (Munsell: 5YR 5/2). Es una roca muy poco homogénea, como consecuencia de la distribución de sus macroporos de hasta 5 cm de diámetro. Presenta fracturas abiertas de diferente grosor, desde milimétricas a centimétricas.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,95%	0,371%	0,19	
Densidad aparente	2366kg/m ³	64,94kg/m ³	0,02	
Densidad real	2469kg/m ³	46,66kg/m ³	0,02	
Porosidad abierta	4,60%	0,769%	0,17	
Resistencia al desgaste por rozamiento	2,82mm	0,784mm	0,28	
Resistencia a la compresión				
 A	A	40,5Mpa	27,00Mpa	0,21
 B	B	39,8Mpa	19,61Mpa	0,15
				1,02
Resistencia a la flexión				
 A	A	8,49Mpa	2,22Mpa	0,26
	B	7,06Mpa	2,05Mpa	0,29
	C	8,85Mpa	1,33Mpa	0,15
				0,22
 B	Tras heladicidad A	9,05Mpa	1,49Mpa	0,16
	Tras heladicidad B	6,64Mpa	1,30Mpa	0,20
 C	Tras heladicidad C	6,87Mpa	3,15Mpa	0,46
				0,32
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	41cm	10,93cm	0,35	
B- estratificación paralela	38cm	9,03cm	0,31	1,07
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	1152,5Mpa	0,52Mpa	0,0004	
B- estratificación paralela	878,3Mpa	0,22Mpa	0,0002	1,31
Colorimetría	L* 67,2	a* 4	b* 9,2	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,87	Isótropo
Resistencia flexión	0,26	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,13	Isótropo
Microdureza Knoop	2,4E-27	Anisótropo
Resistencia al choque	0,56	Isótropo

Sigla: 19-To

Nombre Científico: Bioesparita-Grainstone bioclástico

Nombre Comercial: Piedra Caliza Torre Villores

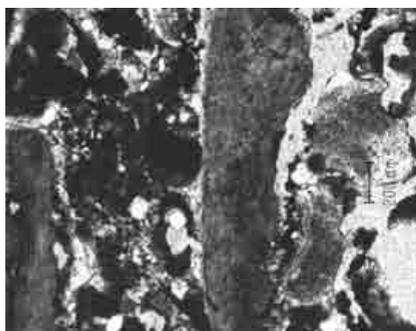
Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

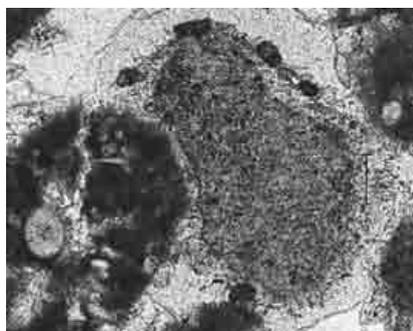
Petrográficamente, la "Piedra Caliza Torre Villores" se describe como una roca carbonatada muy cementada clasificada como Bioesparita según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda granosoportada. Su esqueleto está compuesto por bioclastos 44% (equinodermos (0,9 mm), foraminíferos (0,2 mm), briozoos (0,6 mm) y ostreidos (0,8 mm)) y un 27% de granos no esqueletales, principalmente peloides de tamaño medio 0,3 mm (60%) y, en menor medida, intraclastos de tamaño medio 0,4 mm (40%). La roca está muy cementada con un 25% de cemento de calcita esparítica de tamaño medio 60 micras y tamaño máximo 1 mm, que se dispone en posición interpartícula en forma de mosaicos esparíticos inequigranulares, sintaxiales y drúsicos. Como minerales detríticos destaca la presencia de un 2% de cuarzo. La matriz es inferior al 2%.

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



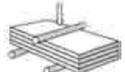
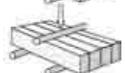
B'

A (x4) Aspecto general de la roca. Fragmentos heterométricos de bioclastos (equinodermos, foraminíferos) y peloides cementados por esparita calcítica en posición intergranular. Escala 200 micras.
A' (x10) Fragmento de briozoo cementado por esparita en posición intergranular. **B-B' (x10)** Detalle de un cemento sintaxial de calcita esparítica.

La roca presenta una selección de 1,2-1,4 con un tamaño máximo de los granos de 2,5 mm y un tamaño medio de 0,75 mm. Los granos son subredondeados-redondeados presentando una esfericidad variable y los contactos son predominantemente de tipo largo.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto laminado, de color naranja amarillento oscuro (Munsell: 10YR 6/6). Tiene una estratificación bien marcada por su contenido fosilífero, de tamaño milimétrico llegando incluso a tamaños centimétricos. Se observa un elevado número de fracturas abiertas o rellenas por material blando paralelas a la estratificación.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	2,15%	0,106%	0,05	
Densidad aparente	2555kg/m ³	31,67kg/m ³	0,01	
Densidad real	2704kg/m ³	28,00kg/m ³	0,01	
Porosidad abierta	5,49%	0,215%	0,04	
Resistencia al deslizamiento	62	1,52	0,02	
Planeidad	8,61mm	3,68mm	0,43	
Resistencia a la compresión				
 A	A 50Mpa	2,93Mpa	0,19	
 B	B 112Mpa	5,19Mpa	0,15	2,24
Resistencia a la flexión				
 A	A 15,90Mpa	0,44Mpa	0,09	
 B	B 12,50Mpa	0,29Mpa	0,07	
 C	C 25,03Mpa	1,32Mpa	0,17	0,70
Tras heladicidad A	18,10Mpa	0,41Mpa	0,07	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	3,0E-06	Anisótropo
Resistencia flexión	1,6E-06	Anisótropo

Sigla: 20-Mi

Nombre Científico: Bioesparita-Grainstone bioclástico

Nombre Comercial: Losa Ocre

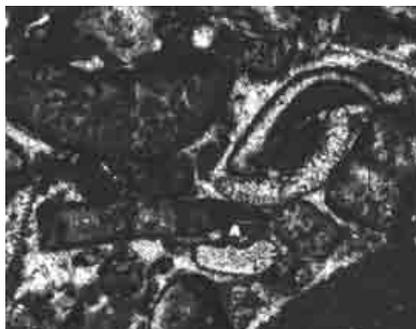
Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra Losa Ocre" se describe como una roca carbonatada clasificada como Bioesparita según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone Bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda granosostenida. Los aloquímicos encontrados son bioclastos 28% con bordes micritizados y en ocasiones, envueltas ferruginosas, intraclastos 19% y ooides 7%. Como minerales detríticos destaca la presencia de cuarzo (menos del 1%). Los granos de mayores dimensiones son los intraclastos (3 mm), mientras que los bioclastos tienen una distribución heterogénea de su tamaño de grano. Los bioclastos presentes son bivalvos (70%) tamaño medio 1,2 mm, equinodermos (20%) tamaño medio 0,35 mm y gasterópodos (10%) tamaño medio 0,5 mm.

Nícoles paralelos

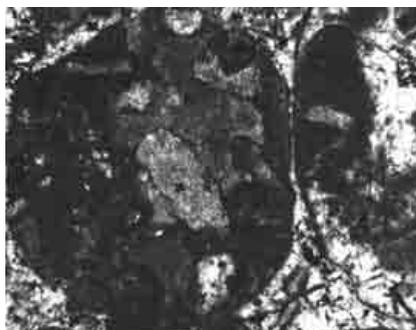


A

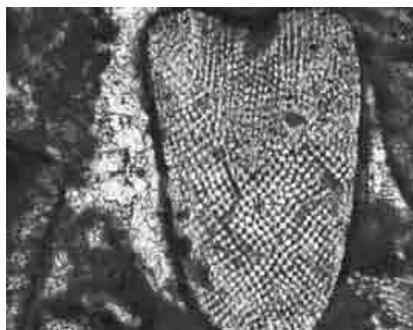


B

Nícoles cruzados



A'



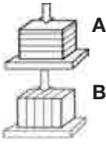
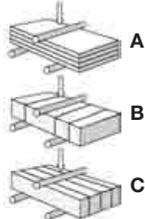
B'

A (x4) Aspecto general de la roca, textura granosostenida. **A' (x4)** Intraclastos cementados por mosaicos esparíticos de calcita. Escala 200 micras. **B (x10)** Detalle de cemento de calcita esparítica en posición intergranular y móldica, en gasterópodo con bordes micritizados. Escala 100 micras. **B' (x10)** Fragmento de equinodermo.

La micrita es muy escasa (3%). La cementación de estos granos la produce la esparita calcífica 39% de tamaño medio 0,2 mm dispuesta en el espacio interpartícula y rellenando la porosidad móldica en forma de mosaicos esparíticos de tipo sintaxial y cemento ferruginoso 5%. La porosidad abierta supone un 3% del total de la roca. Los contactos entre los granos constituyentes son predominantemente puntuales y largos. La roca presenta una selección de 2-2,2.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño de grano medio y color naranja amarillento medio (Munsell: 10YR 7/6). Como discontinuidades principales presenta grietas abiertas de espesor milimétrico, en ocasiones rellenas por material margoso. Los poros de mayores dimensiones alcanzan los 2-3 mm.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	2,35%	0,762%	0,32		
Densidad aparente	2474kg/m ³	85,48kg/m ³	0,03		
Densidad real	2624kg/m ³	44,39kg/m ³	0,02		
Porosidad abierta	5,76%	1,732%	0,30		
Resistencia al deslizamiento	51	1,78	0,03		
Planeidad	13,67mm	3,01mm	0,22		
Resistencia a la compresión					
	A	40,1Mpa	20,51Mpa	0,16	
	B	54,9Mpa	22,01Mpa	0,12	1,37
Resistencia a la flexión					
	A	6,85Mpa	3,67Mpa	0,54	
	B	14,41Mpa	1,86Mpa	0,13	
	C	12,25Mpa	1,72Mpa	0,14	0,68
	Tras heladicidad B	11,96Mpa	1,01Mpa	0,08	
	Tras heladicidad C	6,14Mpa	5,80Mpa	0,94	0,62
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	26mm	1,59mm	0,06		
B- estratificación paralela	27,5mm	2,70mm	0,10	1,06	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,005	Anisótropo
Resistencia flexión	0,0004	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,50	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,24	Isótropo

Sigla: 21-Cv

Nombre Científico: Bioesparita-Grainstone Bioclástico

Nombre Comercial: Laja Verde y Laja Paja

Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, las piedras “Laja Verde” y “Laja Paja” se describen como unas rocas carbonatadas clasificadas como Bioesparitas según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone bioclásticos según Dunham (1962).

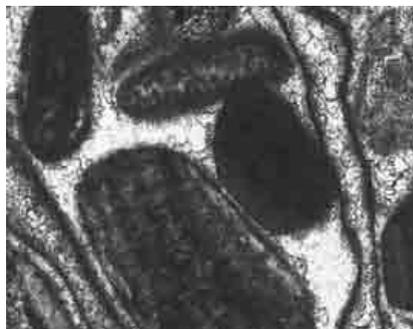
Presentan textura granosostenida de grano medio a grueso. Los aloquímicos corresponden a bioclastos con bordes micritizados y en ocasiones con envueltas ferruginosas, ooides, glauconita, intraclastos y cuarzo de grano fino.

Estas variedades se diferencian entre sí en el porcentaje de aloquímicos. En la variedad 21-Cv1 los aloquímicos son bioclastos 47% (braquiópodos (60%) tamaño medio 2 mm, equinodermos (25%) tamaño medio 0,5 mm y gasterópodos (5%) tamaño medio 0,7 mm) y ooides 10%. En la variedad 21-Cv2 los aloquímicos presentes son bioclastos 38% (braquiópodos (50%) tamaño medio 1,5 mm, equinodermos (28%) tamaño medio 0,5 mm y gasterópodos (12%) tamaño medio 0,4 mm), ooides 15% e intraclastos 5%.

Nícoles paralelos

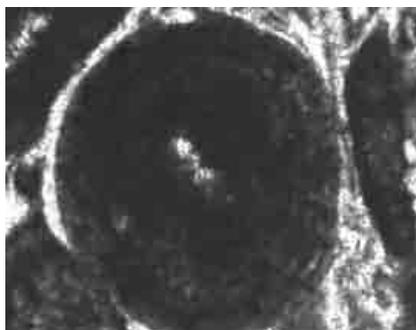


A

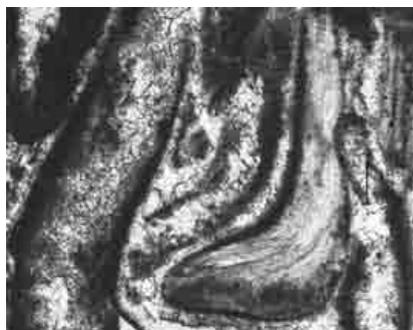


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A (x4) Aspecto general de la roca. Bioclastos (equinodermos, braquiópodos) con bordes micritizados cementados por mosaicos esparíticos de calcita. Escala 200 micras. **A' (x10)** Ooide. Escala 100 micras.

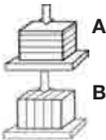
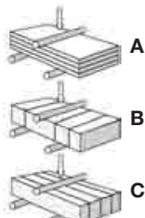
B-B' (x10) Detalle de cemento de calcita esparítica en posición intergranular e intragranular.

B Glauconita. **B'** Fragmento de braquiópodo.

El cemento es de calcita esparítica 30-35% y tiene un tamaño medio de 0,2 mm, localizándose en el espacio intergranular en forma de mosaicos inequigranulares y drúsicos, rellenando la porosidad móldica y como cemento sintaxial de sobrecrecimiento en las placas de equinodermos. Como minerales detríticos destaca la presencia de un 2% de cuarzo de grano fino y glauconita 2-5%. La micrita es muy escasa 3%. La porosidad abierta, supone un 1% del total de la roca. La roca presenta una selección de 2-2,2 y los contactos entre los granos constituyentes son predominantemente puntuales y largos.

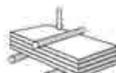
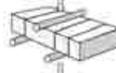
Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, con un color gris oliva claro (Munsell: 5Y 6/1) para la variedad Cv1 y un color marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 6/2) para la variedad Cv2. El tamaño máximo de poro es de 2 mm y se aprecia una cierta laminación definida por la orientación de los microfósiles. Son frecuentes las grietas de amplitud milimétrica, en ocasiones rellenas por material margoso.

Sigla: 21-Cv1		Desviación	Coef.	Anisotropía	
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación		
Absorción	0,70%	0,208%	0,30		
Densidad aparente	2645kg/m ³	17,81kg/m ³	0,007		
Densidad real	2704kg/m ³	3,59kg/m ³	0,001		
Porosidad abierta	1,87%	0,541%	0,29		
Resistencia al deslizamiento	38	1,30	0,03		
Planeidad	15,04mm	4,58mm	0,30		
Resistencia a la compresión					
	A	64,3Mpa	60,74Mpa	0,30	
	B	82,0Mpa	60,76Mpa	0,23	1,28
Resistencia a la flexión					
	A	17,82Mpa	0,24Mpa	0,01	
	B	2,38Mpa	0,43Mpa	0,18	
	C	15,71Mpa	2,16Mpa	0,14	1,29
	Tras heladicidad A	15,73Mpa	1,39Mpa	0,09	
	Tras heladicidad B	1,78Mpa	0,53Mpa	0,30	
	Tras heladicidad C	14,73Mpa	2,64Mpa	0,18	1,30
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	21,5mm	0,41mm	0,02		
B- estratificación paralela	21,5mm	1,46mm	0,07	1	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,15	Isótropo
Resistencia flexión	1,1E-05	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,0009	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,89	Isótropo

Sigla: 21-Cv1 Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,56%	0,142%	0,25	
Densidad aparente	2665kg/m ³	8,87kg/m ³	0,003	
Densidad real	2706kg/m ³	2,45kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	1,49%	0,372%	0,25	
Resistencia al deslizamiento	41	0,89	0,02	
Planeidad	19,63mm	4,58mm	0,30	
Resistencia a la compresión				
 A	A	67,7Mpa	10,63Mpa	0,05
 B	B	70,0Mpa	21,44Mpa	0,10
Resistencia a la flexión				
 A	A	17,77Mpa	0,81Mpa	0,05
 B	B	12,36Mpa	0,70Mpa	0,06
 C	C	18,04Mpa	0,92Mpa	0,05
	Tras heladicidad A	17,96Mpa	2,83Mpa	0,16
	Tras heladicidad B	19,29Mpa	0,50Mpa	0,03
	Tras heladicidad C	13,06Mpa	1,14Mpa	0,09
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	19mm	0,57mm	0,03	
B- estratificación paralela	20mm	2,16mm	0,11	1,05

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,48	Isótropo
Resistencia flexión	0,0002	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,01	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,38	Isótropo

Sigla: 22-Ig

Nombre Científico: Bioesparita-Grainstone bioclástico

Nombre Comercial: Amarilla de Cortes, Laja Oro, Laja Plata

Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

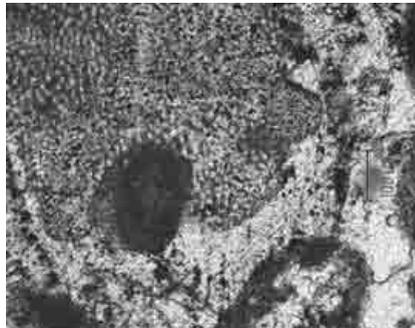
Petrográficamente, la "Piedra de la Iglesuela" se describe como una roca carbonatada clasificada como Bioesparita según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda granosostenida. Los aloquímicos encontrados en el material son bioclastos 61% y ooides 5%. Los bioclastos tienen una distribución heterogénea de su tamaño de grano, correspondiendo los tamaños mayores a los briozoos (2-3 mm). Los bioclastos más abundantes son los equinodermos (40%), tamaño medio 1 mm y los braquiópodos (40%) tamaño medio 0,6 mm. En menor proporción aparecen foraminíferos, gasterópodos y briozoos. La mayoría de estos bioclastos han sufrido procesos de micritización bacteriana, disolución y posterior precipitación de cemento de tipo esparítico rellenando la porosidad preexistente.

Nícoles paralelos

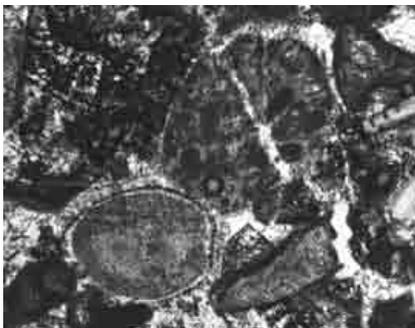


A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura granosostenida. Bioclastos con bordes micritizados cementados por mosaicos esparíticos de calcita. **A** Radiola de equínido y fragmentos de braquiópodos. **A'** Fragmento de briozoos y placas de crinoide. Escala 200 micras. **B-B' (x10)** Placa de crinoide con cemento syntaxial de calcita esparítica.

El cemento de calcita esparítica 33% muestra un tamaño medio de 0,2 mm y un tamaño máximo de 1,2 mm. Se dispone en los espacios interparticulares e intraparticulares con contactos entre los cristales de tipo planar y curvo. Las placas de equinodermo se caracterizan por tener cemento sintaxial de sobrecrecimiento. La matriz micrítica aparece en una proporción del 2% y la porosidad abierta es inferior al 1%. Los contactos entre los granos constituyentes son predominantemente puntuales y largos. La roca presenta una selección de 1,4-2.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color naranja amarillento medio (Munsell: 10Y R 7/6) y tamaño de grano medio-grueso. El tamaño máximo de poro es de 3 mm. No presenta macrofósiles, aunque los microfósiles pueden alcanzar 3,5 mm de longitud. La principal discontinuidad son grietas milimétricas que aparecen frecuentemente selladas por calcita.

Sigla: 21-Cv1		Desviación	Coef.	
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación	Anisotropía
Absorción	1,02%	0,094%	0,09	
Densidad aparente	2629kg/m ³	7,45kg/m ³	0,003	
Densidad real	2692kg/m ³	2,14kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	2,69%	0,240%	0,09	
Resistencia al deslizamiento	52	1,09	0,02	
Planeidad	19,42mm	6,19mm	0,32	
Resistencia a la compresión				
	A	77,2Mpa	30,15Mpa	0,12
	B	110,2Mpa	51,17Mpa	0,23
Resistencia a la flexión				
	A	13,88Mpa	4,22Mpa	0,30
	B	12,29Mpa	2,37Mpa	0,19
	C	16,40Mpa	1,43Mpa	0,08
	Tras heladicidad A	14,54Mpa	6,86Mpa	0,47
	Tras heladicidad B	8,33Mpa	4,40Mpa	0,53
	Tras heladicidad C	17,16Mpa	0,72Mpa	0,04
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	20mm	2,02mm	0,10	
B- estratificación paralela	20,5mm	3,15mm	0,15	1,03

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,39	Isótropo
Resistencia flexión	0,24	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,11	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,79	Isótropo

Sigla: 23-Mq1

Nombre Científico: Biomicrita-Packstone bioclástico

Nombre Comercial: Gris Raíces, Fósil Amarilla, Fósil Blanca

Uso Constructivo: Cantería y lajas

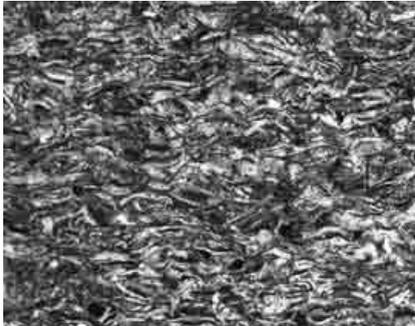
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra Mosqueruela MQ-1" se describe como una roca carbonatada de textura granuda que oscila entre niveles granosostenidos y sostenidos por la matriz, pero siempre laminada por orientación de sus bioclastos. Se clasifica como una Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Packstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

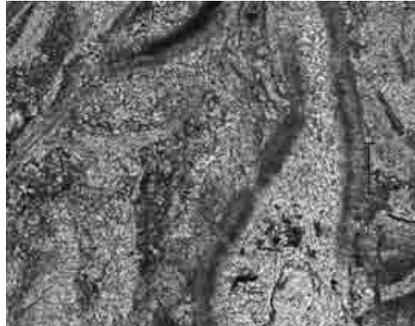
El componente mayoritario son bioclastos 78% (bivalvos de tamaño medio 0,15 mm). En menores proporciones aparecen cuarzo 2% y filosilicatos 1%. La matriz constituye el 15% de la roca y se encuentra parcialmente recristalizada a microesparita.

El cemento de calcita esparítica 2% de tamaño medio 50-60 micras se dispone, principalmente en la porosidad móldica de algunos de los bioclastos. La porosidad de la roca es del 2%.

Nícoles paralelos

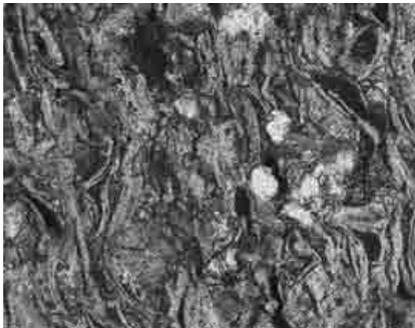


A

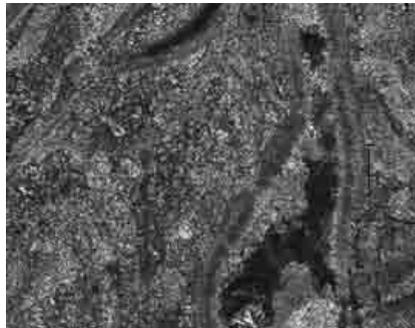


B

Nícoles cruzados



A'



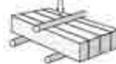
B'

A-A' Aspecto general de la roca. Laminación por la orientación de los bivalvos. **A (x4)** Escala 200 micras. **A' (x10)** Escala 100 micras.

B-B' (x20) Detalle de cemento dispuesto en la porosidad móldica de bivalvos, y de la matriz parcialmente recristalizada a microesparita. Escala 50 micras.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto laminado, de color variable entre gris oliva (Munsell: 5Y 4/1) y marrón anaranjado (Munsell: 10YR 6/3) y tamaño de grano fino-medio. El tamaño máximo de poro es de 2 mm y ocasionalmente presenta fósiles de hasta 0,6 mm. Las principales discontinuidades son laminaciones paralelas y laminación por disolución.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	0,27%	0,058%	0,22		
Densidad aparente	2684kg/m ³	5,16kg/m ³	0,002		
Densidad real	2704kg/m ³	2,40kg/m ³	0,001		
Porosidad abierta	0,72%	0,154%	0,2		
Resistencia al deslizamiento	47	1,51	0,03		
Planeidad	5,08mm	1,33mm	0,26		
Resistencia a la compresión					
 A	A	80,4Mpa	59,12Mpa	0,23	
 B	B	63,9Mpa	81,50Mpa	0,40	1,26
Resistencia a la flexión					
 A	A	25,81Mpa	7,93Mpa	0,31	
 B	B	5,20Mpa	3,46Mpa	0,67	
 C	C	26,20Mpa	7,45Mpa	0,28	1,10
	Tras heladicidad A	31,58Mpa	6,29Mpa	0,20	
	Tras heladicidad B	7,22Mpa	3,21Mpa	0,45	
	Tras heladicidad C	22,33Mpa	5,39Mpa	0,24	1,20
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	19,5mm	1,80mm	0,09		
B- estratificación paralela	23,5mm	0,55mm	0,02	1,21	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,23	Isótropo
Resistencia flexión	5,9E-05	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	2,5E-06	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,0004	Anisótropo

Sigla: 24-MQ2

Nombre Científico: Mq21 Pelmicrita-Wackstone de peloides y bioclastos, Mq22 Biomicrita-Wackstone de bioclastos y peloides, Mq23-Mq24 Biopelmicritas-Wackstone de bioclastos y peloides.

Nombre Comercial: 21-Ciega Blanca, 22-Ciega Gris, 23-Gris Monte, 24-Blanca Paja.

Uso Constructivo: Cantería y lajas

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, las variedades Mq21-22-23-24 de la laja de Mosqueruela se describen como rocas carbonatadas de textura granuda sostenida por la matriz, clasificadas como Biopelmicritas-Pelmicritas según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone de bioclastos y peloides según la clasificación de Dunham (1962).

Las cuatro variedades comerciales de la laja de Mosqueruela presentan una composición petrográfica similar en la que únicamente se observan variaciones en el porcentaje de matriz, peloides y bioclastos que, en conjunto, representan más del 90% de los componentes de la roca. Los aloquímicos constituyentes de estas rocas son bioclastos (foraminíferos, bivalvos y crinoides de tamaño medio 0,15-0,3 mm) y peloides de tamaño medio 0,12 mm. El cemento de calcita esparítica 5-10% se dispone en el espacio intergranular y en la porosidad móldica. La porosidad de estas rocas es inferior al 3%.

Nícoles paralelos

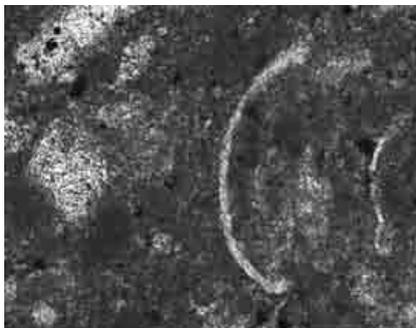


A

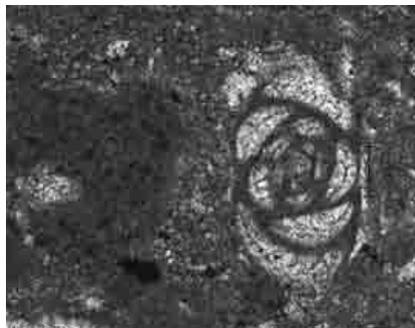


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A (x4) Aspecto general de la roca. Se observan bioclastos (bivalvos y foraminíferos) y peloides englobados en una matriz micrítica. Escala 200 micras.

B-B' (x20) Detalle de cemento de calcita esparítica dispuesto en la porosidad móldica de foraminíferos englobados en matriz micrítica. Escala 50 micras.

La variedad 21 (Pelmicrita-Wackstone de peloides y bioclastos) está constituida por un 8% de bioclastos, 46% de peloides y 41% de micrita. La variedad 22 (Biomicrita-Wackstone de bioclastos y peloides) está compuesta por un 40% de bioclastos, 10% de peloides y 38% de micrita. La variedad 23 (Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides) está formada por un 15% de bioclastos, 15% de peloides y 65% de micrita. Finalmente la variedad 24 (Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides) está constituida por un 32% de bioclastos, 15% de peloides y 48% de micrita.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, la variedad Mq21 presenta un color marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 6/2), la variedad Mq22 marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 5/2), la variedad Mq-23 marrón rosado grisáceo (Munsell: 5YR 6/2) y la variedad Mq-24 marrón pálido (Munsell: 5YR 5/2) con galerías de bioturbación de color naranja amarillento medio (Munsell: 10YR 7/6). Presentan tamaño de grano fino y no tienen microfósiles. Las principales discontinuidades observadas en las cuatro variedades son venillas submilimétricas de continuidad decimétrica rellenas por carbonato.

Sigla: 24-Mq21		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Resultados ensayos tecnológicos				
Absorción	0,33%	0,049%	0,15	
Densidad aparente	2682kg/m ³	7,58kg/m ³	0,003	
Densidad real	2706kg/m ³	4,62kg/m ³	0,003	
Porosidad abierta	0,88%	0,130%	0,15	
Resistencia al deslizamiento	28	6,26	0,22	
Planeidad	9,71mm	3,69mm	0,38	
Resistencia a la compresión				
 A	A 95,7Mpa	63,87Mpa	0,21	
 B	B 78,8Mpa	62,31Mpa	0,25	1,21
Resistencia a la flexión				
 A	A 17,58Mpa	4,13Mpa	0,24	
 B	B 7,28Mpa	4,17Mpa	0,57	
 C	C 20,33Mpa	3,99Mpa	0,20	0,87
 A	Tras heladicidad A 26,90Mpa	3,00Mpa	0,11	
 B	Tras heladicidad B 6,23Mpa	3,39Mpa	0,54	
 C	Tras heladicidad C 19,95Mpa	8,32Mpa	0,42	1,17
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	19mm	1,20mm	0,06	
B- estratificación paralela	20,5mm	1,53mm	0,07	1,08
Colorimetría	L* 65,3	a* 5,7	b* 19,2	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,17	Isótropo
Resistencia flexión	0,003	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,001	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,12	Isótropo

Sigla: 24-Mq22		Desviación	Coef.		
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación	Anisotropía	
Absorción	0,55%	0,275%	0,50		
Densidad aparente	2658kg/m ³	23,35kg/m ³	0,009		
Densidad real	2698kg/m ³	5,94kg/m ³	0,002		
Porosidad abierta	1,47%	0,717%	0,49		
Resistencia al deslizamiento	38	3,11	0,08		
Planeidad	9,75mm	1,30mm	0,06		
Resistencia a la compresión					
 A	A	88,3Mpa	27,97Mpa	0,10	
	B	90,4Mpa	37,45Mpa	0,13	1,02
Resistencia a la flexión					
 A	A	24,26Mpa	2,84Mpa	0,12	
	C	26,05Mpa	1,15Mpa	0,04	0,07
 B	Tras heladicidad A	3,73Mpa	3,75Mpa	1,00	
	Tras heladicidad B	6,17Mpa	3,64Mpa	0,59	
	Tras heladicidad C	23,10Mpa	6,98Mpa	0,30	1,76
 C					
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	20,5mm	1,49mm	0,07		
B- estratificación paralela	20mm	0,69mm	0,03	1,03	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,73	Isótropo
Resistencia flexión	0,36	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,003	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,34	Isótropo

Sigla: 24-Mq23		Desviación	Coef.		
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación	Anisotropía	
Absorción	0,53%	0,255%	0,48		
Densidad aparente	2665kg/m ³	22,49kg/m ³	0,008		
Densidad real	2703kg/m ³	6,33kg/m ³	0,002		
Porosidad abierta	1,40%	0,667%	0,47		
Resistencia al deslizamiento	23	1,30	0,06		
Planeidad	4,92mm	1,85mm	0,38		
Resistencia a la compresión					
 A	A	85,8Mpa	20,49Mpa	0,07	
 B	B	88,7Mpa	33,88Mpa	0,12	1,03
Resistencia a la flexión					
 A	A	14,53Mpa	6,96Mpa	0,48	
 B	B	7,14Mpa	5,64Mpa	0,79	
 C	C	16,03Mpa	5,85Mpa	0,36	0,71
	Tras heladicidad A	10,43Mpa	13,75Mpa	1,32	
	Tras heladicidad B	6,17Mpa	3,64Mpa	0,59	
	Tras heladicidad C	23,10Mpa	6,97Mpa	0,30	1,28
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	20mm	1,49mm	0,07		
B- estratificación paralela	20mm	2,65mm	0,13	1	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,57	Isótropo
Resistencia flexión	0,05	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,11	Isótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,89	Isótropo

Sigla: 24-Mq24		Desviación	Coef.	
Resultados ensayos tecnológicos		Estándar	Variación	Anisotropía
Absorción	0,85%	0,198%	0,23	
Densidad aparente	2632kg/m ³	15,77kg/m ³	0,006	
Densidad real	2692kg/m ³	2,47kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	2,23%	0,504%	0,23	
Resistencia al deslizamiento	31	5,84	0,19	
Planeidad	10,67mm	3,31mm	0,31	
Resistencia a la compresión				
 A	A	77,1Mpa	42,91Mpa	0,17
 B	B	100Mpa	26,91Mpa	0,08
				1,30
Resistencia a la flexión				
 A	A	15,51Mpa	4,47Mpa	0,29
 B	B	10,99Mpa	1,38Mpa	0,12
 C	C	20,45Mpa	2,45Mpa	0,12
				0,60
	Tras heladicidad A	18,62Mpa	6,27Mpa	0,34
	Tras heladicidad B	10,21Mpa	4,17Mpa	0,41
	Tras heladicidad C	22,13Mpa	4,07Mpa	0,18
				0,70
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	19,5mm	2,18mm	0,11	
B- estratificación paralela	21mm	1,24mm	0,06	1,08

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,005	Anisótropo
Resistencia flexión	0,0002	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,006	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,19	Isótropo

Sigla: 25-Pm

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Nombre Comercial: Losa Blanca, Fósil Blanca

Uso Constructivo: Lajas

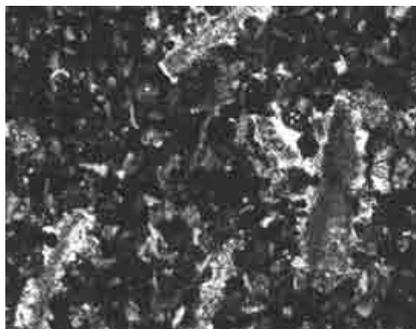
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra Losa Blanca/Fósil Blanca" se describe como una roca carbonatada de grano fino clasificada como una Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

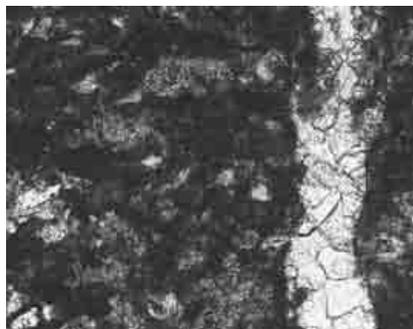
La roca presenta una textura granuda sostenida por la matriz micrítica que constituye el 66% de la roca y se caracteriza por tener un tamaño de grano heterogéneo. Los aloquímicos son bioclastos 20% que corresponden a fragmentos de bivalvos (40%) de tamaño medio 0,2 mm, crinoides (40%) de tamaño medio de 1 mm y máximo de 3 mm y foraminíferos (20%) tamaño medio 0,16 mm. Se identifica también una pequeña proporción (menos de 1%) de cuarzo autigénico.

La calcita esparítica 10% de tamaño medio 0,1 mm se dispone en el espacio intergranular, sellando parte de la porosidad móldica en mosaicos de tipo esparítico sintaxial y en mosaicos drúsicos en la porosidad de fractura. La porosidad de la roca es del 4% y corresponde a poros intergranulares y a la porosidad de fractura.

Nícoles paralelos

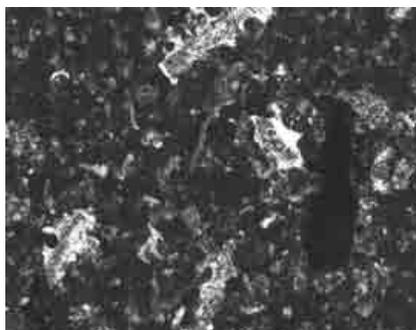


A

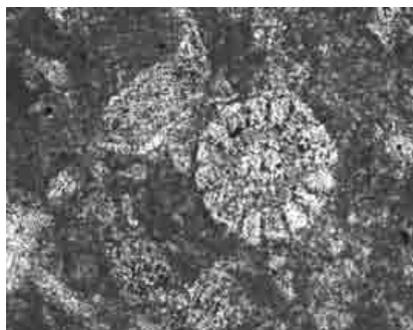


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A - A' (x4) Aspecto general de la roca. Se observan placas de crinoide con cemento de calcita sintaxial. Escala 200 micras.

B (x10) Detalle de cemento de calcita esparítica dispuesto en la porosidad de fractura.

B' (x20) Radiola de equínido. Escala 50 micras.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño de grano muy fino y color marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 6/2). Como discontinuidades principales presenta vénulas desde milimétricas a centimétricas de calcita espartíca de color blanco, y laminación por disolución. Es frecuente la aparición de parches de sílex con tamaños de hasta 10 cm.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,92%	0,106%	0,12	
Densidad aparente	2611kg/m ³	20,10kg/m ³	0,008	
Densidad real	2676kg/m ³	14,59kg/m ³	0,005	
Porosidad abierta	2,40%	0,259%	0,11	
Resistencia al deslizamiento	30	2,04	0,07	
Planeidad	8,92mm	3,75mm	0,42	
Resistencia a la compresión				
 A	A	78,8Mpa	69,18Mpa	0,27
 B	B	81,6Mpa	60,94Mpa	0,23
				1,04
Resistencia a la flexión				
 A	A	11,95Mpa	6,45Mpa	0,57
 B	B	3,33Mpa	2,63Mpa	0,79
 C	C	19,99Mpa	3,47Mpa	0,17
				1,45
Tras heladicidad A		28,30Mpa	11,76Mpa	0,42
Tras heladicidad B		3,29Mpa	3,53Mpa	1,07
Tras heladicidad C		19,05Mpa	7,69Mpa	0,40
				1,48
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	17mm	1,91mm	0,11	
B- estratificación paralela	20,5mm	3,05mm	0,15	1,21

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,81	Isótropo
Resistencia flexión	0,0004	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,0004	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,06	Isótropo

Sigla: 26-No

Nombre científico: Intraesparita-Grainstone intraclástico

Nombre Comercial: Losa Amarilla y Roja

Uso Constructivo: Lajas

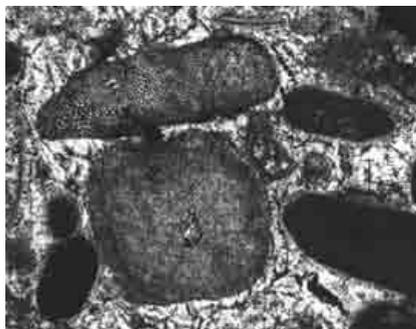
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra Losa Amarilla y Roja" se describe como una roca carbonatada clasificada como Intraesparita según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone intraclástico según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda granosostenida. Los aloquímicos son bioclastos 44%, intraclastos 26% y ooides 1%. Los bioclastos muestran una distribución heterogénea de su tamaño de grano, correspondiendo los tamaños mayores a los briozoos 2 mm. Los bioclastos más abundantes son los equinodermos (68%), tamaño medio de 0,7 mm, foraminíferos, bivalvos y briozoos. La mayoría de estos bioclastos presentan procesos de micritización bacteriana.

Es una roca muy cementada. El cemento es de calcita esparítica 20% con contactos de tipo planar y ferruginoso 1%. El cemento presenta un tamaño medio de 0,15 mm y se dispone tapijando parcialmente la porosidad interpartícula, intrapartícula y de fractura (en mosaicos de tipo

Nícoles paralelos



A

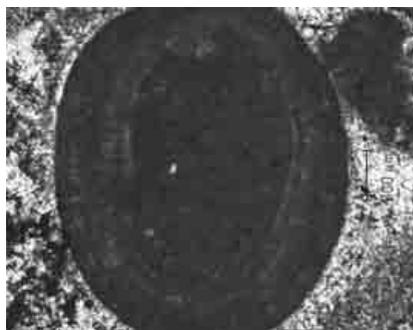


B

Nícoles cruzados



A'



B'

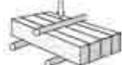
A-A'-B (x4) Aspecto general de la roca. **A** Fragmentos de equinodermos cementados por calcita esparítica intergranular. **A'** Intraclasto y placa de crinoide.

B Cuarzos, intraclastos y fragmentos de bioclastos (equinodermos y foraminíferos) cementados por calcita esparítica. Escala 200 micras. **B'** (x10) Ooide. Escala 100 micras.

drúscico). Las placas de equinodermo se caracterizan por presentar cemento sintaxial de sobrecrecimiento. La matriz micrítica se encuentra en una proporción del 5%. La porosidad abierta 2% corresponde a macroporos interparticulares y a la porosidad de fractura. Los contactos entre los granos constituyentes son predominantemente puntuales. La roca tiene una selección de 1,4-2.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño de grano medio-grueso y color marrón claro (Munsell: 5YR 5/6). A pesar de su homogeneidad, se observa una tenue laminación por la orientación de los microfósiles. Como discontinuidades principales presenta grietas abiertas milimétricas a centimétricas y laminación por disolución. Los poros pueden alcanzar hasta 4 mm de diámetro.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,42%	0,078%	0,19	
Densidad aparente	2687kg/m ³	52,74kg/m ³	0,02	
Densidad real	2717kg/m ³	55,82kg/m ³	0,02	
Porosidad abierta	1,12%	0,215%	0,19	
Resistencia al deslizamiento	41	2,12	0,05	
Planeidad	14,58mm	5,41mm	0,37	
Resistencia a la compresión				
 A	A 60,2Mpa	46,47Mpa	0,24	
 B	B 65,2Mpa	35,63Mpa	0,17	1,08
Resistencia a la flexión				
 A	A 17,56Mpa	2,24Mpa	0,13	
 B	B 13,37Mpa	2,24Mpa	0,17	
 C	C 16,33Mpa	2,77Mpa	0,17	0,27
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	21mm	1,03mm	0,05	
B- estratificación paralela	22,5mm	1,11mm	0,05	1,07

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,52	Isótropo
Resistencia flexión	0,01	Anisótropo
Resistencia al desgaste por abrasión	0,06	Isótropo

Sigla: 27-Tr

Nombre Científico: Caliza travertínica recristalizada-Sparstone

Nombre Comercial: Travertino Teruel

Uso Constructivo: Ornamental

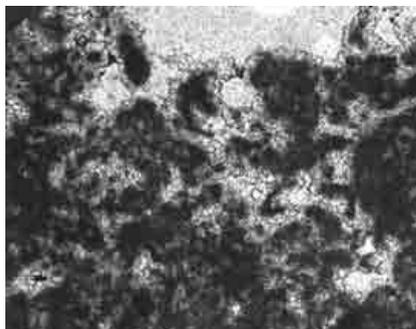
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la piedra "Travertino Teruel" se describe como una caliza travertínica recristalizada de composición calcítica en su totalidad, clasificada como un Sparstone (Wright 1992).

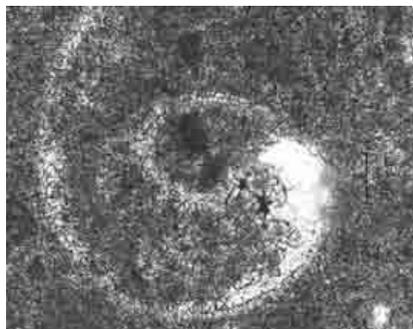
La roca posee una textura cristalina compuesta por cristales subidiomorfos inequigranulares de calcita microesparítica 60% de 15 micras de tamaño medio con contactos predominantemente de tipo planar y calcita esparítica 15%. La calcita esparítica se caracteriza por presentar sus bordes cristalinos irregulares y una distribución aleatoria de su tamaño de grano, siendo el tamaño medio de 50-60 micras. Los cristales de calcita de mayor tamaño se encuentran tapizando la porosidad secundaria. Se reconocen relictos de bioclastos de 0,3 mm de tamaño medio flotando en los mosaicos esparíticos y microesparíticos.

La roca presenta una porosidad elevada 25%, con un amplio rango de tamaños de poro. No existe un tamaño de poro predominante y los tamaños máximos son de 5-6 mm.

Nícoles paralelos

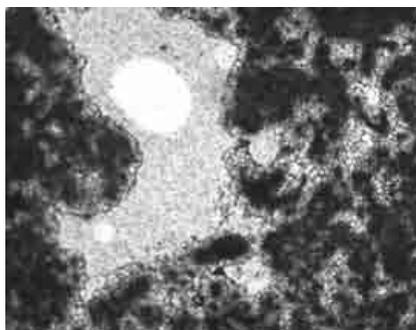


A

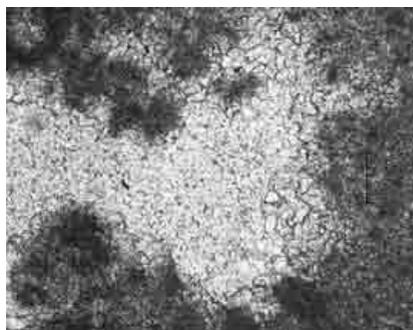


B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura cristalina. Cristales subidiomorfos de calcita microesparítica. Amplio rango de tamaños de poro. **B (x10)** Microesparita calcítica en mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares con relictos de bioclastos.

B'(x10) Calcita esparítica en el contorno de la porosidad secundaria. Escala 100 micras.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, cristalino, oqueroso de color naranja muy pálido (Munsell: 10YR 8/2) y de grano fino. Es una roca muy poco homogénea como consecuencia de la distribución aleatoria de sus macroporos de hasta 2 cm de diámetro. No presenta discontinuidades abiertas importantes.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,66%	0,122%	0,07	
Densidad aparente	2462kg/m ³	11,69kg/m ³	0,005	
Densidad real	2563kg/m ³	6,61kg/m ³	0,003	
Porosidad abierta	4,09%	0,285%	0,07	
Resistencia al desgaste por rozamiento	3,03mm	0,76mm	0,25	
Resistencia a la compresión				
 A	A	41,2Mpa	14,39Mpa	0,11
 B	B	38,8Mpa	24,72Mpa	0,20
				1,06
Resistencia a la flexión				
 A	A	9,52Mpa	1,14Mpa	0,12
	B	10,23Mpa	1,11Mpa	0,11
	C	10,43Mpa	0,68Mpa	0,06
				0,09
 B	Tras heladicidad A	10,74Mpa	0,75Mpa	0,07
	Tras heladicidad B	10,70Mpa	0,56Mpa	0,05
 C	Tras heladicidad C	10,76Mpa	1,33Mpa	0,12
				0,01
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	33cm	9,54cm	0,40	
B- estratificación paralela	31cm	8,83cm	0,38	1,04
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	812,6Mpa	0,87Mpa	0,001	
B- estratificación paralela	936,9Mpa	0,47Mpa	0,0005	1,15
Colorimetría	L* 80,7	a* 2,4	b* 9,6	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,53	Isótropo
Resistencia flexión	0,28	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,99	Isótropo
Microdureza Knoop	1,9E-21	Anisótropo
Resistencia al choque	0,87	Isótropo

Sigla: 28-Crt

Nombre Científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Nombre Comercial: Crema Teruel

Uso Constructivo: Ornamental

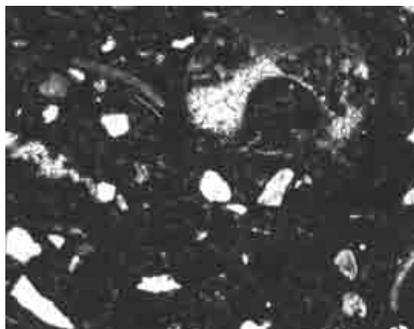
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la "Piedra Crema Teruel" se describe como una roca carbonatada clasificada como Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone Bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

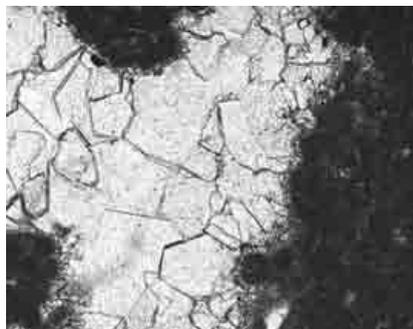
Presenta una textura granuda sostenida por la matriz. Los aloquímicos encontrados corresponden a bioclastos 30% (bivalvos y gasterópodos (55%) de tamaño medio 0,1 mm, ostrácodos (28%) tamaño medio 0,4 mm y caráceas (15%) tamaño medio 1 mm). Se identifican también cuarzo 7% y filosilicatos 2%. En algunos de estos bioclastos se reconocen procesos de micritización bacteriana. La matriz micrítica supone un 40% y los granos micríticos un 10%. La matriz micrítica no tiene un tamaño de grano homogéneo.

El cemento es de calcita esparítica 10%, presenta un tamaño medio de 50-60 micras y unos contactos entre los cristales de tipo curvo. Se dispone principalmente en la porosidad inter-

Nícoles paralelos

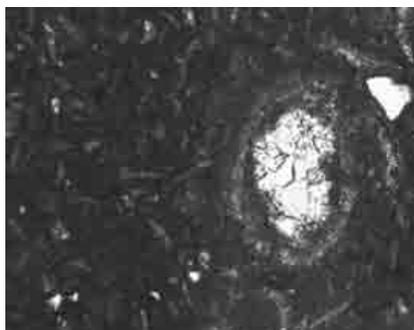


A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A (x4) Aspecto general de la roca. Clastos de cuarzo y bioclastos (gasterópodos, bivalvos y ostrácodos) englobados en una matriz micrítica. Escala 200 micras. **A' (x10)** Carofitas y fragmentos de bivalvos. Escala 100 micras. **B-B' (x10)** Detalle de cemento de calcita esparítica en mosaico drúsico. Escala 100 micras.

partícula y mólida en mosaicos de tamaño equigranular y, accesoriamente, en mosaicos drú-sicos rellenando la porosidad de fractura. La porosidad abierta supone un 3% del volumen de la roca.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color marrón amarillento pálido (Munsell: 10YR 7/2) y de grano fino. Es una roca bastante homogénea con una macroporosidad importante de diámetro variable y, en algunos casos, tapizada por calcita esparítica que forman geodas de escala centimétrica. No presenta discontinuidades.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	1,21%	0,083%	0,07	
Densidad aparente	2581kg/m ³	4,48kg/m ³	0,002	
Densidad real	2663kg/m ³	1,95kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	3,12%	0,210%	0,07	
Resistencia al desgaste por rozamiento	1,78mm	0,27mm	0,15	
Resistencia a la compresión				
 A	A	102,9Mpa	54,27Mpa	0,16
 B	B	98Mpa	34,74Mpa	0,11
				1,05
Resistencia a la flexión				
 A	A	15,59Mpa	2,12Mpa	0,14
	B	15,26Mpa	1,72Mpa	0,11
	C	15,19Mpa	1,63Mpa	0,11
				0,03
 B	Tras heladicidad A	13,52Mpa	4,89Mpa	0,36
	Tras heladicidad B	17,10Mpa	2,27Mpa	0,13
 C	Tras heladicidad C	14,58Mpa	2,38Mpa	0,16
				0,24
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	30cm	9,91cm	0,47	
B- estratificación paralela	29cm	10,15cm	0,52	1,11
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	936,9Mpa	1,05Mpa	0,001	
B- estratificación paralela	776,6Mpa	0,77Mpa	0,0009	1,21
Colorimetría	L* 65,4	a* 6,2	b* 17,3	

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,57	Isótropo
Resistencia flexión	0,92	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,12	Isótropo
Microdureza Knoop	2,4E-21	Anisótropo
Resistencia al choque	0,77	Isótropo

Sigla: 29-A

Nombre Científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides

Nombre Comercial: Abanto Primera

Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra Abanto Primera” se describe como una roca carbonatada clasificada como Biopelmicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone de bioclastos y peloides según la clasificación de Dunham (1962).

Presenta una textura granuda variable, predominantemente sostenida por la matriz, pero con zonas de textura granosostenida. Los aloquímicos son bioclastos 15% (foraminíferos y en menor proporción fragmentos de bivalvos, rudistas y corales de tamaño medio 0,2 mm) y peloides 6% de tamaño medio 0,1 mm. Algunos de estos bioclastos muestran procesos de micritización bacteriana. La matriz micrítica y los granos micríticos suponen el 50% de la roca. La matriz micrítica no presenta un valor homogéneo en su tamaño de grano, encontrando zonas con valores inferiores a 1 micra y otras zonas con incipientes procesos de neomorfismo de micrita a microesparita.

Nícoles paralelos

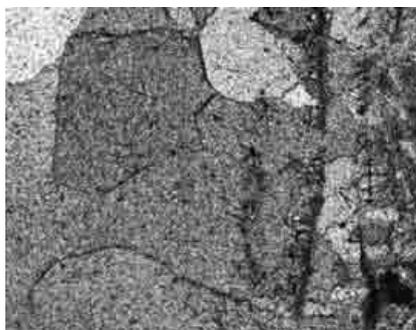


A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Aspecto general de la roca. Matriz micrítica englobando a fragmentos de bioclastos (foraminíferos y bivalvos). **A'** Calcita esparítica en mosaico drúsico en la porosidad secundaria. Escala 200 micras. **B-B' (x10)** Detalle de la matriz micrítica, peloides y del cemento calcítico en la porosidad móldica de foraminíferos. Escala 100 micras.

Es una roca bien cementada con un 26% de cemento de calcita esparítica (0,1 mm) dispuesto principalmente en mosaicos de tamaño equigranular. Este cemento se localiza en el espacio intergranular, rellenando parte de la porosidad móldica de los bioclastos y sellando parte de la porosidad de fractura generada por los procesos de deformación tectónica. Los contactos entre los granos son escasos y de tipo puntual. La roca presenta una selección de 1,2-1,4, con un tamaño medio de los granos de 0,15 mm.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color naranja muy pálido (Munsell: 10YR 8/2) con abundantes estilolitos de color marrón rojizo medio (Munsell: 10R 4/6) y tamaño de grano fino. Presenta fracturas abiertas, ocasionalmente con relleno calcítico y poros aislados de hasta 1 cm de diámetro. Se encuentran fragmentos de fósiles de hasta 1 cm de longitud.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Absorción	0,24%	0,040%	0,16	
Densidad aparente	2687kg/m ³	3,83kg/m ³	0,001	
Densidad real	2704kg/m ³	2,43kg/m ³	0,001	
Porosidad abierta	0,65%	0,106%	0,16	
Resistencia a la compresión	A 113Mpa	1,89Mpa	0,03	
 A				
 B				
Resistencia a la flexión	A 12,04Mpa	0,80Mpa	0,33	
 A				
 B				
 C				
Colorimetría	L* 72,2	a* 7,3	b* 15,0	

Sigla: 30-D

Nombre Científico: Sparstone

Nombre Comercial: Abanto Comercial

Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la piedra "Abanto Comercial" se describe como un carbonato cristali-
no clasificado como un Sparstone (Wright 1992).

La roca estudiada no presenta restos de la textura original, que ha sido borrada durante la
diagénesis por los procesos de dolomitización-desdolomitización. La textura predominante es
de mosaico hipidiotópico (planar S) de cristales subeuhedrales con algunos cristales euhedra-
les y con límite entre los cristales predominantemente planar. El tamaño medio de los cristales
romboédricos es de 0,4-0,6 mm. En una primera fase tuvieron lugar los procesos de dolomi-
tización del material originándose una porosidad secundaria intercrystalina 15-18% que se
encuentra rellena principalmente por cemento de calcita esparítica equigranular (90%) y en un
(10%) inequigranular. En un segundo estadio, ha sufrido procesos de desdolomitización prác-
ticamente total (90%). Esta desdolomitización ha comenzado en los núcleos de los romboedros

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A-A' (x4) Zona teñida. **A** Cristales romboédricos de dolomita englobados en cemento de calcita
esparítica. **A'** Porosidad de fractura sellada por calcita esparítica. Escala 200 micras. **B-B' (x10)**
Desdolomitización en romboedros de dolomita. La desdolomitización ha comenzado en el núcleo de los
romboedros de dolomita. Escala 100 micras.

de dolomita y se ha extendido hacia el exterior del cristal, quedando únicamente dolomitizados los bordes de los cristales.

La fracturación producida por procesos de deformación tectónica ha generado una porosidad de fractura del 5%, que aparece parcialmente rellena por un mosaico de calcita esparítica equigranular.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño cristalino medio y color naranja grisáceo (Munsell: 10R 8/2). Es una roca muy homogénea con zonas esparíticas de hasta 1 cm de diámetro. No presenta ningún tipo de discontinuidad.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación
Absorción	1,32%	0,172%	0,13
Densidad aparente	2590kg/m ³	26,34kg/m ³	0,01
Densidad real	2682kg/m ³	23,56kg/m ³	0,009
Porosidad abierta	3,43%	0,422%	0,12

Sigla: 31-B11

Nombre Científico: Dolosparstone

Nombre Comercial: Blancas Crema

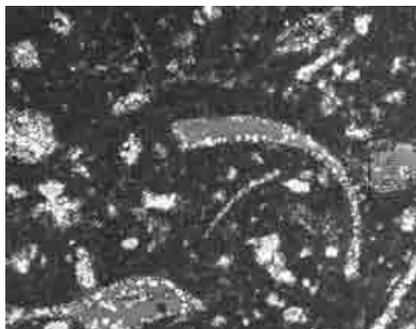
Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

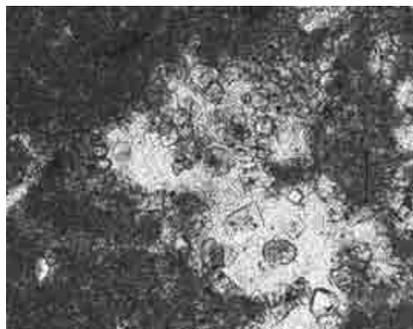
Petrográficamente, la roca "Blancas Crema" se define como un Dolosparstone (Wright, 1992). Se trata de una roca carbonatada recristalizada y parcialmente dolomitizada.

En la roca se observan como texturas relictas fantasmas de bioclastos, puestos de manifiesto por la heterometría de los cristales de dolomita (principalmente fragmentos de ostrácos y en menor medida lamelibranquios y gasterópodos). Estos fantasmas de bioclastos suponen un 40% de la roca. El tamaño máximo de los bioclastos es de 6,4 mm, mientras que el tamaño promedio es de 0,4-0,6 mm. La roca presenta un aspecto cristalino, compuesta principalmente por un mosaico de cristales subeuhedrales de micrita dolomítica 70% de 3 micras de tamaño medio y microesparítica dolomítica 10% de tamaño medio 25 micras.

Nícoles paralelos



A



B

Nícoles cruzados



A'



B'

A (x4) A' (x10) Aspecto general de la roca, zona teñida. Mosaico de cristales de dolomitic micrita y microesparita dolomítica. En la porosidad se localiza calcita esparítica.

B-B' (x10) Dolomitic micrita y cristales de microesparita dolomítica en el contorno de la porosidad secundaria. Escala 100 micras.

La porosidad secundaria interpartícula es del 20% y se encuentra parcialmente sellada (10%) por cristales anhedrales de calcita esparítica en forma de mosaicos inequigranulares y drúsicos de tamaño medio 200 micras. Los poros de mayor tamaño alcanzan 1,5 mm.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño de grano fino y color heterogéneo. La matriz presenta un color naranja muy pálido (10YR 8/2), las galerías de bioturba- ción tienen un color marrón amarillento pálido (10YR 6/2) y los parches esparíticos tienen un color (5YR 4/1). Como discontinuidades principales aparecen grietas abiertas submilimétricas. Se han observado geodas rellenas por calcita esparítica de hasta 1 cm de longitud y poros abiertos con un tamaño máximo de 6 mm.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación
Absorción	3,78%	0,407%	0,11
Densidad aparente	2436kg/m ³	58,35kg/m ³	0,02
Densidad real	2683kg/m ³	43,61kg/m ³	0,02
Porosidad abierta	9,19%	0,786%	0,08
Resistencia a la compresión			
 A	A	77,42Mpa	
 B			
Resistencia a la flexión			
 A	A	11,36Mpa	
 B			
 C			
Colorimetría	L* 76,6	a* 2,4	b* 9,5

Sigla: 31-BI2

Nombre Científico: Dolosparstone

Nombre Comercial: Blancas Jaspe

Uso Constructivo: Ornamental

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la roca "Blancas Jaspe" se define como un Doloesparstone (Wright, 1992). Se trata de una roca carbonatada recristalizada y parcialmente dolomitizada.

En la roca se observan como texturas relictas fantasmas de bioclastos (conchas de ostrá-codos 8% de 1 mm de tamaño medio), puestas de manifiesto por la heterometría de los cristales de dolomita. La roca presenta un aspecto cristalino, compuesto principalmente por cristales de dolomita micrítica de 2 micras de tamaño medio 74,2% y, en menor cantidad, por cristales hipidiomorfos de dolomita microesparítica 9,3% de tamaño medio 25 micras. Estos cristales de dolomita de mayor tamaño se encuentran homogéneamente repartidos en la lámina y se sitúan rellenando pequeños poros, bordeando poros mayores o en el interior de la calcita esparítica. Las zonas bioturbadas aparecen parcialmente oxidadas.

La calcita esparítica inequigranular 9,2% está constituida por cristales de grandes dimensiones de tamaño medio 250 micras y tamaño máximo de hasta 1 mm, que se disponen bor-

Nícoles paralelos

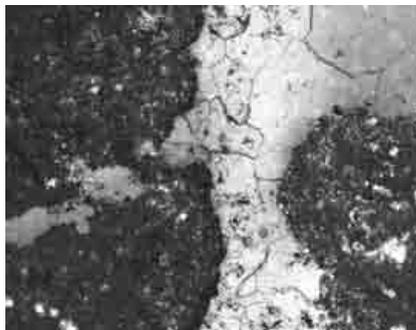


A

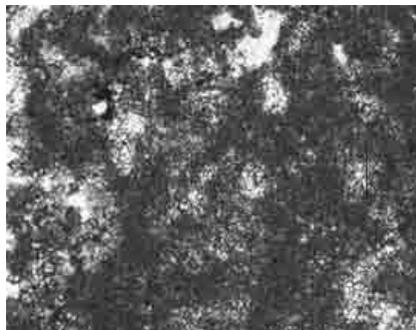


B

Nícoles cruzados



A'



B'

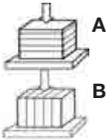
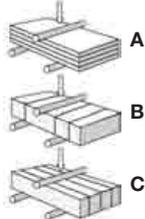
A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Mosaico de cristales de dolomicrita y microesparita dolomítica. En la porosidad se localizan mosaicos de calcita esparítica.

B-B' (x10) Dolomicrita, microesparita dolomítica (en los bordes de los poros) y mosaicos esparíticos de calcita en la porosidad secundaria. Escala 100 micras.

deando y/o tapizando parte de la porosidad secundaria de la roca. Los contactos entre los cristales de la calcita esparítica son planares y curvos. La porosidad de esta roca 7,3% presenta un tamaño medio de 50-60 micras.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño de grano fino y color heterogéneo. La matriz presenta tonos marrones amarillentos (10YR 8/4), las galerías de bioturbación presentan un color marrón amarillento pálido (10YR 6/2) y los parches esparíticos tienen un color (5YR 4/1). Como discontinuidades principales aparecen grietas abiertas milimétricas-submilimétricas. Aparecen geodas rellenas por calcita esparítica de hasta 0,8 cm de longitud y poros abiertos de hasta 1 cm.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	3,83%	1,513%	0,39		
Densidad aparente	2454kg/m ³	12,84kg/m ³	0,02		
Densidad real	2720kg/m ³	4,40kg/m ³	0,02		
Porosidad abierta	9,30%	3,468%	0,37		
Resistencia al desgaste por rozamiento	2,70mm	0,16mm	0,06		
Resistencia a la compresión					
	A	56,4Mpa	61,51Mpa	0,34	
	B	51,6Mpa	44,05Mpa	0,26	1,09
Resistencia a la flexión					
	A	8,80Mpa	0,89Mpa	0,10	
	B	8,63Mpa	0,91Mpa	0,10	
	C	8,86Mpa	1,30Mpa	0,15	0,03
	Tras heladicidad A	9,98Mpa	1,79Mpa	0,18	
	Tras heladicidad B	7,61Mpa	0,96Mpa	0,13	
	Tras heladicidad C	9,39Mpa	0,66Mpa	0,07	0,26
Resistencia al choque					
A- estratificación perpendicular	29cm	6,51cm	0,28		
B- estratificación paralela	28cm	8,45cm	0,42	0,15	
Microdureza Knoop					
A- estratificación perpendicular	878,3Mpa	0,46Mpa	0,0005		
B- estratificación paralela	952,4Mpa	0,064Mpa	0,0006	1,08	
Colorimetría	L* 80,5	a* 2,2	b* 11,2		

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,63	Isótropo
Resistencia flexión	0,98	Isótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,12	Isótropo
Microdureza Knoop	3,7E-20	Anisótropo
Resistencia al choque	0,57	Isótropo

Sigla: 31-BI3

Nombre Científico: Dolosparstone

Nombre Comercial: Blancas Moka

Uso Constructivo: Ornamental

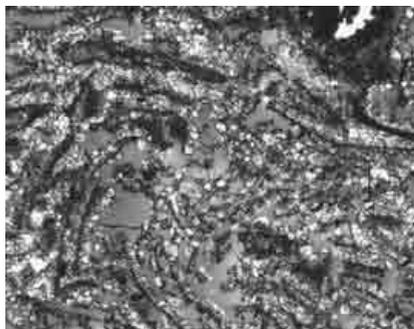
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la roca "Blancas Moka" se define como un Dolosparstone (Wright, 1992). Se trata de una roca carbonatada recristalizada y parcialmente dolomitizada.

En la roca se observan, como texturas relictas, fantasmas de bioclastos, puestos de manifiesto por la heterometría de los cristales de dolomita. Los fantasmas de aloquímicos corresponden a fragmentos de conchas de bivalvos con un tamaño medio de 0,9 mm, así como a sus envueltas micríticas. La roca presenta aspecto cristalino, compuesta principalmente por un mosaico hipidiotópico de cristales subeuhedrales de microesparita dolomítica 72% de 30 micras de tamaño medio con contactos rectos y curvos y por un 5% de micrita dolomítica.

El cemento de calcita esparítica 13% en mosaico inequigranular, de tamaño medio 150 micras, sella parcialmente la porosidad secundaria del material. Los contactos entre los cristales de la calcita esparítica son planares y curvos. La porosidad móldica 7% aparece rellena por

Nícoles paralelos

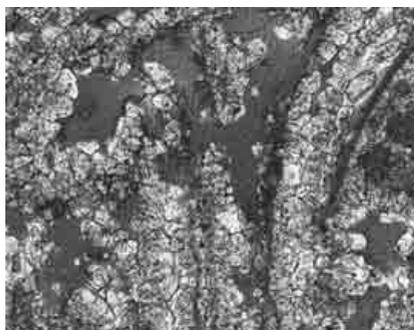


A

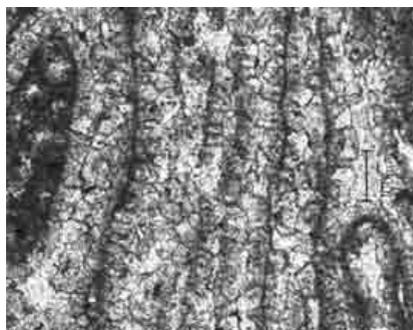


B

Nícoles cruzados



A'



B'

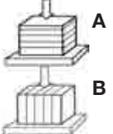
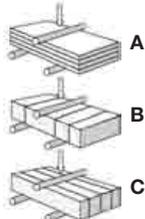
A (x4)-A' (x10) Zona teñida. Fantasmas de bioclastos puestos de manifiesto por la heterometría de cristales de dolomita englobados en cemento de calcita esparítica.

B-B' (x10) Dolomicrita, microesparítica dolomítica (en los bordes de los poros) y mosaicos esparíticos de calcita inequigranular en la porosidad secundaria.

dolomita esparítica equigranular con un tamaño medio de 40 micras. La porosidad secundaria interpartícula abierta es del 5%. Los poros de mayor tamaño alcanzan 1,5 mm.

Descripción de Visu:

Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, tamaño de grano fino y color amarillento pálido (Munsell: 10YR 7/2 a 10YR 8/2). No presenta discontinuidades importantes. Se han encontrado geodas rellenas por calcita esparítica de hasta 6 mm de longitud, poros abiertos con un tamaño máximo de 3 mm de diámetro y porosidades móldicas rellenas por calcita esparítica de hasta 4 mm.

Resultados ensayos tecnológicos		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Absorción	2,76%	0,859%	0,31		
Densidad aparente	2473kg/m ³	35,39kg/m ³	0,02		
Densidad real	2656kg/m ³	10,92kg/m ³	0,003		
Porosidad abierta	6,80%	1,945%	0,28		
Resistencia al desgaste por rozamiento	2,23mm	0,721mm	0,32		
Resistencia a la compresión					
	A	44,3Mpa	80,72Mpa	0,57	
	B	60Mpa	32,07Mpa	0,17	1,35
Resistencia a la flexión					
	A	11,76Mpa	1,71Mpa	0,14	
	B	5,31Mpa	0,52Mpa	0,10	
	C	6,20Mpa	0,99Mpa	0,16	0,83
	Tras heladicidad A	8,84Mpa	4,17Mpa	0,47	
	Tras heladicidad B	6,28Mpa	0,69Mpa	0,11	
	Tras heladicidad C	5,53Mpa	1,31Mpa	0,24	0,48
Resistencia al choque					
A- estratificación perpendicular	33cm	9,91cm	0,28		
B- estratificación paralela	30cm	8,45cm	0,44	1,04	
Microdureza Knoop					
A- estratificación perpendicular	1578,2Mpa	0,74Mpa	0,0004		
B- estratificación paralela	1289,3Mpa	1,28Mpa	0,0009	1,22	
Colorimetría	L* 80,8	a* 2,2	b* 9,4		

Análisis de la varianza

	Hipótesis nula	Comportamiento
Resistencia compresión	0,42	Isótropo
Resistencia flexión	1,6E-07	Anisótropo
Resistencia flexión tras heladicidad	0,09	Isótropo
Microdureza Knoop	2,4E-23	Anisótropo
Resistencia al choque	0,76	Isótropo

V.3. Interpretación de los resultados de los ensayos tecnológicos

La variación de las propiedades físicas de las rocas presenta una singular importancia para establecer los criterios de uso de los materiales pétreos desde el punto de vista aplicado. La interpretación de los datos de los ensayos tecnológicos ha permitido establecer una serie de correlaciones entre las propiedades físicas y características petrográficas (mineralogía y textura) con los ensayos mecánicos; evaluar el tipo de comportamiento que presenta el material; evaluar su durabilidad mediante el ensayo tecnológico de resistencia a flexión tras heladicidad; establecer una adecuación de uso según sus principales características y, finalmente, realizar una clasificación tecnológica del material.

En la literatura científica está ampliamente reconocido el papel de la porosidad como parámetro que controla el resto de las propiedades de las rocas. Diferentes investigadores han establecido relaciones entre porosidad y resistencia mecánica a compresión uniaxial tanto para arenitas (Hoshino, 1974; Bell, 1978; Shakoor and Bonelli, 1991; Vernik *et al.*, 1993; Ulusay *et al.*, 1994), como para rocas carbonatadas (Tugçrul and Zarif, 2000b; Palchik and Hatzor, 2002). Las conclusiones generales, indican un aumento en la resistencia mecánica con la disminución de la porosidad. Fahy and Guccione (1979) establecieron relaciones entre la resistencia mecánica y el porcentaje de matriz y cemento y Vutukuri *et al.*, (1974) señalaron que, dentro de las rocas detríticas cementadas, las que tenían una mayor resistencia mecánica eran las que presentaban cemento de naturaleza silíceo, seguidas por aquellas rocas con cemento de naturaleza calcárea, mientras que las rocas con porcentajes elevados de minerales arcillosos mostraban los valores de resistencia mecánica más bajos.

Para las rocas carbonatadas, Török (2006) indicó que, pese a que la porosidad presenta un control importante en la resistencia del material e informa de manera preliminar sobre su resistencia mecánica, las diferencias texturales en estas rocas originan importantes variaciones en su comportamiento físico y mecánico. Otras investigaciones (Olsson, 1974; Fredrich *et al.*, 1990; Wong *et al.*, 1996) muestran una buena correlación entre resistencia mecánica y la inversa de la raíz cuadrada del diámetro medio de grano para rocas homogéneas, en las que la única variabilidad textural viene marcada por el tamaño de grano. En general, para rocas no homogéneas se considera que la relación entre tamaño de grano y resistencia mecánica es menos importante (Hatzor *et al.*, 1997; Palchick and Hatzor 2000).

Con el objetivo de determinar la influencia de la porosidad abierta (la porosidad abierta, densidad aparente y contenido de agua en saturación son parámetros dependientes entre sí) en las diferentes propiedades mecánicas del material, se ha realizado un análisis estadístico de regresión y correlación simple, enfrentando la porosidad con el resto de propiedades mecánicas y calculando la curva (gráfico) que mejor se ajusta para ambas secuencias por el método de mínimos cuadrados, así como la calidad del "ajuste" mediante el coeficiente de correlación R. Coeficientes de correlación superiores a 0,8 son considerados estadísticamente significativos (Jonson, 1984), valores de R comprendidos entre 0,7 y 0,8 se consideran como una estimación aproximada de la propiedad física implicada en la correlación, mientras que valores inferiores indican una baja correlación y la existencia de otros factores afectando a ambas propiedades.

Este estudio se ha completado con análisis estadísticos de regresión y correlación simple entre, la resistencia mecánica a flexión y compresión y las características petrográficas en las rocas detríticas y, análisis estadísticos de regresión y correlación múltiple entre la resistencia mecánica a flexión y compresión y las características petrográficas en las rocas carbonatadas.

El análisis de regresión múltiple es una técnica que consiste en estimar una variable dependiente (variable que se predice o calcula, cuya representación es "Y") que en nuestro caso es la resistencia mecánica a compresión y la resistencia mecánica a flexión, utilizando dos o más variables independientes (son las variables que proporcionan las bases para el cálculo y cuya representación es: X1, X2, X3...). Los análisis de regresión múltiple se aplican con el objetivo de obtener modelos de comportamiento global. Este tipo de análisis son especialmente útiles en geología, ya que en la mayoría de procesos intervienen diferentes factores, los cuales son imposibles de aislar y estudiar por separado (Davis, 1973).

V.3.1. CORRELACIÓN ENTRE CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN ARENITAS

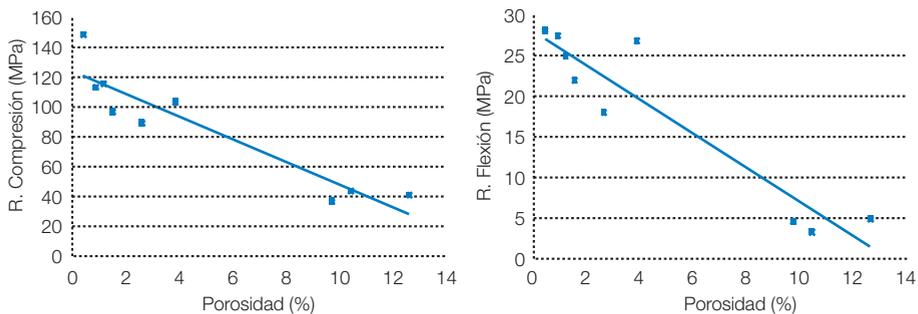
V.3.1.1. Correlación entre porosidad y propiedades mecánicas

Las rocas areníticas investigadas presentan correlaciones estadísticamente significativas entre porosidad abierta y resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión con unos valores de R de 0,929 y 0,939 respectivamente (figura V-5). En la tabla V-4 se muestra la ecuación y coeficiente de correlación para estas propiedades.

Existe una relación inversa, en las rocas areníticas, entre porosidad y resistencia mecánica a compresión y flexión, aumentando los valores de resistencia mecánica conforme disminuye la porosidad.

■ FIGURA V.5

Gráficos de correlación entre resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión con la porosidad abierta en arenitas



■ TABLA V.4

Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R

	Ecuación	R
Porosidad-Compresión	$y = -7,57x + 123,3$	0,929
Porosidad-Flexión	$y = -2,11x + 28,04$	0,939

Las correlaciones estimadas entre la porosidad abierta y los ensayos de resistencia al deslizamiento y resistencia al desgaste por abrasión son de 0,725 y 0,756 respectivamente (tabla V-5). Estos valores indican que la resistencia al deslizamiento aumenta con la porosidad, mien-

tras que la resistencia al desgaste por abrasión aumenta conforme disminuye su valor. Estos valores del coeficiente de correlación no son considerados estadísticamente significativos, indicando la existencia de otros parámetros que afectan a esta propiedad.

■ TABLA V. 5

Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R

	Ecuación	R
Porosidad-Deslizamiento	$y = 0,7428x + 62,643$	0,725
Porosidad-Desgaste por abrasión	$y = 1,3492x + 17,516$	0,756

V.3.1.2. Correlación entre mineralogía y textura con las propiedades mecánicas

Las nueve arenitas caracterizadas presentan una muy buena correlación, como hemos visto en el apartado anterior, entre resistencia mecánica y porosidad. Al estudiar en detalle las cinco variedades comerciales de arenitas eocenas, explotadas en el Prepirineo navarro-aragonés (tabla V-6) pertenecientes a las cuencas de Jaca-Pamplona y de Ainsa, se observa como la baja porosidad de estas arenitas les confiere una elevada resistencia, tanto a compresión como flexión así como frente a los fenómenos atmosféricos. Sin embargo, las diferencias dentro de los elevados valores en los resultados de los ensayos mecánicos están controladas en mayor medida por variaciones en su mineralogía que por variaciones en el porcentaje de porosidad.

La baja porosidad que caracteriza a estas arenitas es interpretada como resultado de una alta acumulación de sedimentos que originaron un enterramiento profundo y las fuertes presiones dirigidas durante el plegamiento alpino.

■ TABLA V. 6

Composición textural en porcentaje de las arenitas eocenas pirenaicas

Muestra	Clastos Cuarzo	Clastos Feldespato	Cemento	Matriz/Ox Fe	Frag. Líticos (Met)(cal)(dolo)	Selección
1-Ye	26,2	1,3	32	6,1	34,3(19,4;74,8;5,8)	1,4
2-Ma	23,1	0,6	11,3	4,5	60,4(39,1;52,6;8,3)	1,6
3-En	14,79	1,75	10	1,06	67,2(36,1;59,5;39)	1,3
4-Hu	13,9	5,2	18,8	4,6	57,5(27,0;63,5;9,5)	1,3
5-Pa	30	3,2	4,4	6,3	56,1(61,2;24,3;4,5)	1,3

La correlación estadística realizada entre los valores de resistencia geomecánica y las características texturales y mineralógicas en estas variedades de arenitas Eocenas indican que la correlación entre resistencia mecánica a compresión y porosidad abierta es de 0,6 (tabla V-7), mientras que la correlación entre la resistencia mecánica a la compresión y la composición textural es superior a la anterior, destacando la correlación con el porcentaje de cemento (R 0,88) y con el porcentaje de clastos de fragmentos de roca (R 0,81). Del mismo modo, la correlación entre resistencia mecánica a flexión y la porosidad abierta es de 0,18, mientras que la correlación entre la resistencia mecánica a flexión y la composición textural es superior a la anterior como en el caso de la resistencia a compresión. La correlación entre resistencia mecánica a flexión con el porcentaje de cemento es de 0,68 y con el porcentaje de clastos de fragmentos de roca es de 0,84.

El estudio estadístico realizado indica una relación lineal y directamente proporcional entre la resistencia a compresión y la resistencia flexión con el porcentaje de cemento, y una relación lineal e inversamente proporcional con el porcentaje de fragmentos de roca.

■ TABLA V. 7

Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficientes de correlación R

	Ecuación	R
Resistencia compresión-Frag. líticos	$y = -1,2966x + 186,1$	0,808
Resistencia compresión-Cemento	$y = 1,6515x + 89,372$	0,884
Resistencia compresión-Porosidad	$y = -8,9367x + 128,76$	0,600
Resistencia flexión-Frag. líticos	$y = -0,081x + 31,424$	0,837
Resistencia flexión-Cemento	$y = 0,0769x + 25,784$	0,682
Resistencia flexión-Porosidad	$y = -0,1672x + 27,224$	0,18

V.3.2. CORRELACIÓN ENTRE CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN ROCAS CARBONATADAS

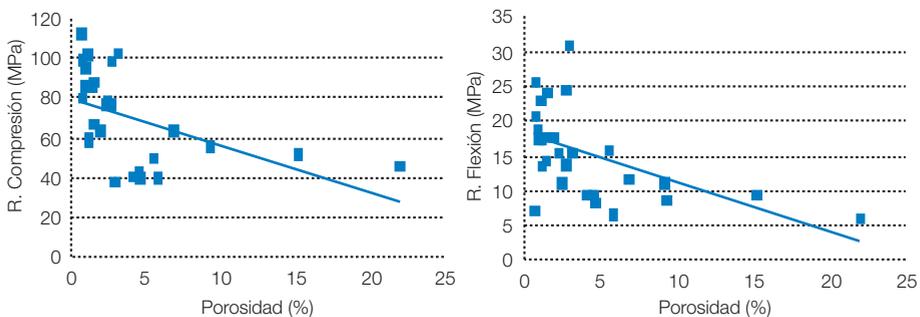
V.3.2.1. Correlación entre porosidad y propiedades mecánicas

Las 31 rocas carbonatadas caracterizadas en la presente tesis doctoral muestran una baja correlación entre porosidad abierta y resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión (figura V-6), con unos índices de correlación R de 0,493 y 0,526 respectivamente (tabla V-8).

El estudio estadístico realizado indica una relación lineal e inversamente proporcional entre la resistencia a compresión y a flexión con la porosidad del material.

■ FIGURA V.6

Gráficos de correlación entre resistencia mecánica a compresión, y resistencia mecánica a flexión con la porosidad



■ TABLA V. 8

Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R

	Ecuación	R
Porosidad-Compresión	$y = -2,3369x + 79,976$	0,493
Porosidad-Flexión	$y = -0,6963x + 18,214$	0,526

Las correlaciones estimadas para el resto de los ensayos mecánicos realizados en las rocas carbonatadas muestran unos coeficientes de correlación muy bajos (tabla V-9), lo que indica la baja incidencia de la porosidad en el control de estas propiedades.

■ TABLA V. 9

Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R entre porosidad y propiedades mecánicas

		Ecuación	R
Uso Ornamental	Porosidad-Desgaste por rozamiento	$y = -0,0508x + 2,9894$	0,259
	Porosidad-Microdureza Knoop	$y = 31,404x + 873,89$	0,300
	Porosidad-Resistencia al choque	$y = -0,2512x + 25,146$	0,200
Uso Cantería-Lajas	Porosidad-Desgaste por abrasión	$y = 0,7606x + 19,388$	0,417
	Porosidad-Resistencia al deslizamiento	$y = 3,832x + 34,089$	0,490
	Porosidad-Planeidad	$y = -0,0003x + 11,777$	0,001

V.3.2.2. Correlación entre mineralogía y textura con las propiedades mecánicas

La baja correlación existente entre la porosidad y los ensayos mecánicos en las rocas carbonatadas investigadas son consecuencia de sus importantes diferencias texturales, resultado de su complejo origen e historia evolutiva. Estas diferencias texturales se reflejan en el comportamiento mecánico del material, existiendo una buena correlación entre las características texturales y mineralógicas de la roca y su resistencia mecánica.

La correlación entre las características texturales y mineralógicas con la resistencia mecánica se ha realizado mediante un estudio estadístico de análisis de correlación múltiple.

Inicialmente se ha creado una base de datos incluyendo, tanto los resultados de los ensayos mecánicos de compresión y flexión, como los posibles parámetros petrográficos que podrían influir en la resistencia mecánica de los materiales (tabla V-10). Los parámetros considerados han sido: porcentaje de matriz, porcentaje de cemento, porcentaje de granos y cuarzo, tamaño de la matriz, tamaño del cemento y tamaño medio de todos los componentes de la roca. El tipo de contacto entre los cristales de cemento y el tipo de contacto entre los aloquímicos que constituyen el esqueleto de estos materiales han sido predominantemente rectos y curvos y puntuales y largos respectivamente, por lo que no se han considerado como elementos texturales discriminantes en la resistencia mecánica de estas rocas carbonatadas.

La selección de los parámetros petrográficos discriminantes para el estudio estadístico se ha realizado en función de su significado físico y según el procedimiento estadístico de la redundancia. En la primera etapa para la selección de los parámetros se ha realizado un análisis de regresión simple respecto del ensayo de resistencia a la compresión (tabla V-11) y respecto del ensayo de resistencia a la flexión (tabla V-12).

Como se observa en la tabla V-11, las mayores correlaciones entre parámetros texturales y resistencia mecánica a compresión corresponden al tamaño de los clastos, porcentaje de cemento, porcentaje de porosidad, porcentaje de clastos y cuarzo y tamaño de la matriz. Los parámetros “porcentaje de granos más cuarzo” y “tamaño medio de la matriz” han sido descartados por presentar unos valores elevados de correlación con otros de los parámetros, que a su vez tienen una correlación más elevada con la resistencia mecánica a compresión. El parámetro “tamaño medio de los clastos” ha sido eliminado (pese a presentar una correlación mayor

con la resistencia mecánica a compresión que el porcentaje de cemento) por la ausencia de granos en un número importante de las rocas caracterizadas.

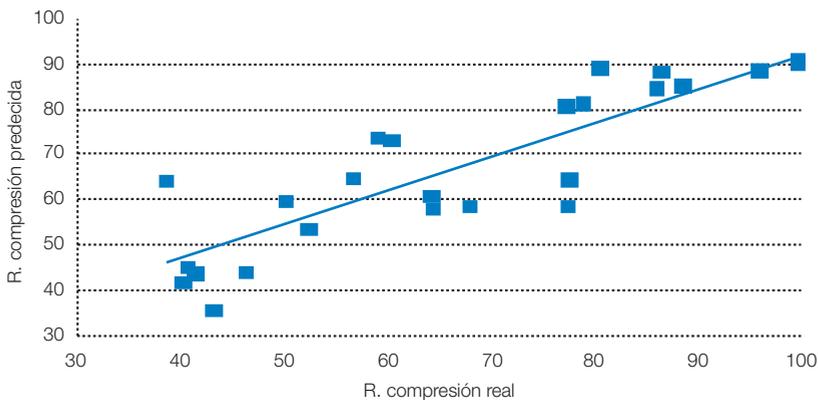
Finalmente y tras la elección de las variables “porcentaje de porosidad” y “porcentaje de cemento”, se ha realizado el análisis de regresión múltiple obteniendo un coeficiente de correlación múltiple para la resistencia a compresión de 0,86 con la ecuación:

$$\sigma = 94,93 - 2,17 \times \text{porcentaje porosidad} - 0,93 \times \text{porcentaje cemento}$$

En esta correlación existe un mayor peso estadístico por parte del porcentaje de cemento (R: 0,54) que por parte del porcentaje de porosidad (R: 0,47). En la figura V-7 se ha representado el gráfico de correlación entre los valores reales de resistencia mecánica a la compresión, frente a los obtenidos por análisis de regresión múltiple.

■ FIGURA V.7

Gráfica de correlación entre resistencia mecánica a compresión real y la predicha por análisis de correlación múltiple



Como se observa en la tabla V-12, las mayores correlaciones entre parámetros texturales y resistencia mecánica a flexión corresponden al porcentaje de porosidad, porcentaje de clastos y cuarzo, porcentaje de cemento y porcentaje de matriz. El parámetro “porcentaje de clastos y cuarzo” ha sido descartado por presentar unos valores elevados de correlación con otros de los parámetros.

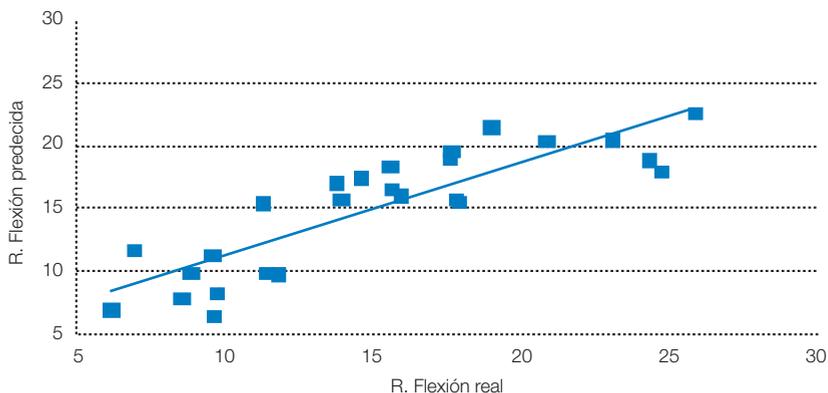
Tras la elección de las variables porcentaje de porosidad, porcentaje de cemento y porcentaje de matriz se ha realizado el análisis de regresión múltiple obteniendo un coeficiente de correlación múltiple para la resistencia a flexión de 0,86 con la ecuación:

$$\sigma = 24,67 - 0,52 \times \text{porcentaje porosidad} - 0,08 \times \text{porcentaje cemento} - 0,22 \times \text{porcentaje matriz}$$

Existe un mayor peso estadístico por parte del porcentaje de porosidad (R: 0,52) con una menor contribución del porcentaje de cemento (R: 0,32) y de matriz (R: 0,30). En la figura V-8 se han representado los valores reales de resistencia mecánica a la flexión frente a los valores obtenidos por análisis de regresión múltiple.

■ FIGURA V.8

Gráfica de correlación entre resistencia mecánica a flexión real y la predecida por análisis de correlación múltiple



Aumentando el número de variables en la ecuación de regresión múltiple se podría encontrar una mayor correlación, pero resulta evidente que la fiabilidad de este tipo de modelos depende de las variables seleccionadas y, dado que el objetivo es encontrar un modelo de predicción global, es importante seleccionarlas teniendo en cuenta su significado físico.

Además de las correlaciones estadísticamente significativas obtenidas mediante el análisis estadístico de correlación múltiple entre parámetros texturales y resistencia mecánica en las rocas carbonatadas, también se ha determinado la existencia de una buena correlación entre los diferentes grupos texturales de rocas carbonatadas con la resistencia mecánica a compresión. En la figura V-9 se representan los valores de resistencia mecánica a compresión frente a porosidad para cada uno de los seis grupos texturales diferenciados.

Grupo A. Constituido por biomicritas porosas (porosidad superior al 10%). Las rocas pertenecientes a este grupo presentan unas porosidades comprendidas entre 15 y 22% y unos valores de resistencia a compresión que oscilan entre 46 y 52 MPa.

Material	Porosidad	R. Compresión
9-Fr	15,2	52,2
8-Tu	22,02	46,1

Grupo B. Constituido por carbonatos recristalizados calcíticos. Las rocas pertenecientes a este grupo presentan unas porosidades comprendidas entre 2,9 y 4,6% y unos valores de resistencia a compresión que oscilan entre 38 y 43 MPa.

Material	Porosidad	R. Compresión
15-Ce	2,88	38,5
27-Tr	4,09	41,2
16-VI-I	4,51	43
18-VI-II	4,6	40,5

Grupo C. Constituido por carbonatos recristalizados dolomíticos. Las rocas pertenecientes a este grupo presentan unas porosidades comprendidas entre 6,8 y 9,2% y unos valores de resistencia a compresión que oscilan entre 56 y 77 MPa.

Material	Porosidad	R. Compresión
31-BI3	6,80	64,01
31-BI1	9,19	77,42
31-BI2	6,30	56,40

Grupo D. Constituido por bioesparitas porosas (porosidad superior al 3%). Las rocas pertenecientes a este grupo presentan unas porosidades comprendidas entre 5,5 y 5,8% y unos valores de resistencia a compresión que oscilan entre 40 y 50 MPa.

Material	Porosidad	R. Compresión
19-To	5,49	50
20-Mi	5,76	40,10

Grupo E. Constituido por bioesparitas (porosidad inferior al 3%). Las rocas pertenecientes a este grupo presentan un rango de porosidades reducido 1,12-2,69% y unos valores de resistencia a compresión que oscilan entre 60 y 77 MPa.

Material	Porosidad	R. Compresión
26-No	1,12	60,20
21-Cv2	1,49	67,70
21-Cv1	1,87	64,30
22-Ig	2,69	77,20

Grupo F. Constituido por biomicritas, biopelmicritas y pelmicritas (porosidad inferior al 3,2%). Las rocas pertenecientes a este grupo presentan los valores mayores de resistencia a compresión. El rango de porosidad de estas rocas es muy pequeño y oscila entre 0,72 y 3,12% y los valores de resistencia mecánica (con la excepción de la caliza de Alacón) se sitúan entre 77

Material	Porosidad	R. Compresión
14-Al	1,12	58,80
29-A	0,65	113
12-Ca3	0,72	99,40
23-Mq1	0,72	80,40
12-Ca2	0,82	86,30
24-Mq21	0,88	95,70
12-Ca1	1,02	102
24-Mq23	1,40	85,80
24-Mq22	1,47	88,30
24-Mq24	2,23	77,10
25-Pm	2,40	78,80
13-Pu	2,66	99,30
28-Crt	3,12	102,90

TABLA V. 10

Resumen del estudio petrográfico y de los ensayos mecánicos (MPa). Los tamaños se expresan en mm y el porcentaje de matriz, cemento y granos más cuarzo se ha recalculado sobre el 100%

	R. Compresión	R. Flexión	Porosidad	Matriz	Cemento	Granos y Q	Tamaño matriz	Tamaño cemento	Tamaño clastos	Tamaño medio
8-Tu	46,10	6,1	22,02	65,17	3,37	31,46	0,00	0,04	0,30	0,10
9-Fr	52,20	9,65	15,20	76,92	8,79	14,29	0,00	0,05	0,40	0,06
12-Ca1	102,00	23,04	1,03	31,96	4,12	63,92	0,00	0,15	0,08	0,06
12-Ca2	86,30	18,92	0,82	21,65	4,12	74,23	0,00	0,15	0,07	0,06
12-Ca3	99,40	20,79	0,72	38,14	3,09	58,76	0,00	0,15	0,08	0,05
13-Pu	99,30	24,64	2,66	40,82	8,16	51,02	0,00	0,30	0,48	0,27
14-Al	58,80	13,74	1,12	30,21	19,79	50,00	0,00	0,15	0,84	0,45
15-Ce	38,50	31	2,88	73,68	26,32	0,00	0,02	0,19	0,00	0,06
16-VI-I	43,00	9,55	4,51	47,06	52,94	0,00	0,03	0,23	0,00	0,13
18VI-II	40,50	8,49	4,60	57,32	42,68	0,00	0,01	0,07	0,00	0,04
19-To	50,00	15,9	5,49	2,00	25,00	73,00	0,00	0,06	0,58	0,44
20-Mi	40,10	6,85	5,76	2,97	43,56	53,47	0,00	0,20	1,20	0,73
21-Cv1	64,30	17,82	1,87	3,19	35,11	61,70	0,00	0,20	1,28	0,86
21-Cv2	67,70	17,77	1,49	3,13	35,42	61,46	0,00	0,22	0,92	0,64
22-Ig	77,20	13,88	2,69	1,98	32,67	65,35	0,00	0,20	0,80	0,59
23-Mq1	80,40	25,81	0,72	14,58	2,08	83,33	0,00	0,06	0,15	0,13
24-Mq21	95,70	17,58	0,88	41,00	5,00	54,00	0,00	0,06	0,13	0,07
24-Mq22	88,30	24,26	1,47	40,00	7,37	52,63	0,00	0,06	0,18	0,10
24-Mq23	85,80	14,53	1,40	64,95	4,12	30,93	0,00	0,06	0,16	0,05
24-Mq24	77,10	15,51	2,23	47,47	5,05	47,47	0,00	0,06	0,17	0,09
25-Pm	78,80	11,25	2,40	68,75	9,38	21,88	0,00	0,10	0,51	0,12
26-No	60,20	17,56	1,12	5,15	20,62	74,23	0,00	0,15	0,92	0,71
27-Tr	41,20	9,52	4,09	80,00	20,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,02
28-Ort	102,90	15,59	3,12	45,35	11,63	43,02	0,00	0,06	0,32	0,14
29-A	113,00	7,4	0,65	51,55	26,80	21,65	0,00	0,10	0,17	0,06
31-B11	77,42	8,8	9,19	88,89	11,11	0,00	0,00	0,20	0,00	0,03
31-B12	56,40	11,36	9,30	89,30	10,70	0,00	0,00	0,25	0,00	0,03
31-B13	64,01	11,76	6,80	79,38	20,62	0,00	0,03	0,15	0,00	0,05

■ TABLA V. 11

Análisis de regresión simple entre resistencia mecánica a compresión y los parámetros petrográficos determinados

	Compresión	Porosidad	Porcentaje matriz	Porcentaje cemento	Porcentaje clastos-Q	Tamaño matriz	Tamaño T cemento	Tamaño clastos	Tamaño medio
Compresión	1,00								
Porosidad	-0,47	1,00							
Porcentaje matriz	-0,11	0,45	1,00						
Porcentaje cemento	-0,54	-0,08	-0,29	1,00					
Porcentaje clastos y Q	0,39	-0,42	-0,87	-0,22	1,00				
Tamaño matriz	-0,47	0,10	0,42	0,45	-0,66	1,00			
Tamaño cemento	-0,05	-0,14	-0,15	0,37	-0,04	0,15	1,00		
Tamaño clastos	-0,63	0,02	-0,59	0,85	0,17	0,00	0,56	1,00	
Tamaño medio	-0,22	-0,19	-0,78	0,51	0,53	-0,29	0,38	0,96	1,00

■ TABLA V. 12

Análisis de regresión simple entre resistencia mecánica a flexión y los parámetros petrográficos determinados

	Flexión	Porosidad	Porcentaje matriz	Porcentaje cemento	Porcentaje clastos-Q	Tamaño matriz	Tamaño T cemento	Tamaño clastos	Tamaño medio
Flexión	1,00								
Porosidad	-0,53	1,00							
Porcentaje matriz	-0,30	0,45	1,00						
Porcentaje cemento	-0,32	-0,08	-0,29	1,00					
Porcentaje clastos y Q	0,47	-0,42	-0,87	-0,22	1,00				
Tamaño matriz	-0,16	0,10	0,42	0,45	-0,66	1,00			
Tamaño cemento	0,15	-0,14	-0,15	0,37	-0,04	0,15	1,00		
Tamaño clastos	-0,06	-0,10	-0,70	0,38	0,52	-0,43	0,27	1,00	
Tamaño medio	0,02	-0,19	-0,78	0,51	0,53	-0,29	0,38	0,95	1,00

V.3.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL

El presuponer un comportamiento isótropo y homogéneo de la piedra natural puede conducir a importantes problemas tras su puesta en obra. En este apartado, el objetivo es valorar, mediante el uso de técnicas estadísticas, el tipo de comportamiento de cada material en función de la propiedad medida.

V.3.3.1. Comportamiento hídrico

La heterogeneidad en el comportamiento hídrico de estos materiales se ha evaluado mediante el coeficiente de variación en el ensayo de absorción. Valores bajos de este coeficiente indican una alta concentración de los resultados (los valores individuales se acercan unos respecto a otros) y, por lo tanto, un comportamiento homogéneo del material. Las rocas carbonatadas recristalizadas 15-Ce, 31-BI2, 31-BI3, las biomicritas 12-Ca3, 14-Al, 24-Mq22, 24-Mq23 y la bioesparita 20-Mi presentan un comportamiento heterogéneo respecto al ensayo de absorción, lo que indica una cierta variabilidad en el sistema poroso de estos materiales (tabla V-13). Esta variabilidad está especialmente marcada en 15-Ce y 14-Al.

Las rocas que no aparecen recogidas en la tabla V-13 son aquellas que presentan un coeficiente de variación inferior a 0,3 y, por lo tanto, se les puede asignar un comportamiento homogéneo. Conforme aumenta este coeficiente de variación, mayor es la dispersión de los resultados de absorción de las probetas individuales de cada tipo rocoso y mayor es la heterogeneidad de su comportamiento.

■ TABLA V. 13

Rocas con valores en el coeficiente de variación para el ensayo de absorción superior a 0,3

Coefficiente variación	Materiales
0,7-0,6	15-Ce
0,6-0,5	14-Al
0,5-0,4	24-Mq22, 24-Mq23
0,4-0,3	12-Ca3, 20-Mi, 31-BI2, 31-BI3

V.3.3.2. Comportamiento mecánico

El comportamiento mecánico del material se ha evaluado mediante el estudio estadístico de análisis de la varianza (ANOVA) para los ensayos de resistencia a compresión, resistencia a flexión, resistencia al choque, microdureza Knoop y resistencia al desgaste. Valores de H_0 inferiores a 0,05 indican un comportamiento anisótropo del material respecto a la propiedad medida con un nivel de confianza del 95% (tabla V-14). Los materiales se han dividido en grupos en función de su clasificación petrográfica. Dentro de cada grupo de materiales, los ensayos realizados han dependido del uso constructivo predominante del material.

Rocas Areníticas

■ TABLA V. 14A

Valores de H_0 en las rocas areníticas

Material	Resistencia compresión	Resistencia flexión	Flexión tras heladicidad	Desgaste por abrasión
3-En	0,635	0,771	0,146	0,696
4-Hu	0,188	0,0057	0,175	0,152
5-Pa	0,868	0,0004	0,039	0,923
6-Un	0,991	0,39	0,090	0,052
7-Ay	0,0021	0,061	3,3E-09	0,001
10-Az	0,372	1,3E-06	7,5E-05	0,369
11-Ta	0,956			

Las rocas areníticas caracterizadas presentan un comportamiento isótropo respecto a los ensayos de resistencia a compresión y de resistencia al desgaste por abrasión, con la excepción de la arenita de Ayerbe (7-Ay). El comportamiento anisótropo de este material limita su uso en función de la orientación y, por lo tanto, sería necesario un control para su puesta en obra con el objeto de evitar posibles problemas por el inadecuado uso del mismo.

Respecto al ensayo de flexión la arenita miocena de Alcañiz (10-Az) y las arenitas eocenas de Fiscal (4-Hu) y de Pueyo de Araguás (5-Pa) muestran un comportamiento anisótropo, aunque en estos casos este comportamiento no supone una limitación en el uso ingenieril de estos materiales. En el caso de la arenita de Alcañiz (10-Az), la anisotropía viene marcada por una elevada resistencia en una de las tres direcciones de medida que destaca sobre los valores alcanzados en las otras dos direcciones, pero que aun así son superiores a otras rocas de su mismo tipo (6-Un y 7-Ay). En el caso de las arenitas eocenas los valores de resistencia mecánica a flexión en las orientaciones con menor valor son lo suficientemente altos para cumplir con las sollicitaciones estándar.

Rocas Carbonatadas

■ TABLA V. 14B

Valores de H_0 en las biomicitas

Material	Resistencia compresión	Resistencia flexión	Flexión tras heladicidad	Desgaste por abrasión	Microdureza Knoop	Resistencia al choque
9-Fr	0,852	0,121	3,4E-11	0,415		
12-Ca2	0,200	8,0E-08	0,069		1,1E-24	0,315
12-Ca1	0,393	1,8E-05	3,1E-05		8,0E-27	0,614
12-Ca3	0,424				9,9E-17	0,707
13-Pu	0,813	0,007	0,010		1,0E-25	0,636
14-Al	0,878	0,572	0,677	0,642		
23-Mq1	0,228	5,9E-05	2,4E-06	0,0004		
24-Mq21	0,168	0,0035	0,001	0,124		
24-Mq22	0,733	0,3593	0,003	0,345		
24-Mq23	0,574	0,054	0,111	0,895		
24-Mq24	0,005	0,0002	0,006	0,188		
25-Pm	0,813	0,0004	0,0004	0,057		
28-Crt	0,566	0,920	0,121		2,4E-21	0,774

■ TABLA V. 14C

Valores de H_0 en los carbonatos recristalizados

Material	Resistencia compresión	Resistencia flexión	Flexión tras heladicidad	Microdureza Knoop	Resistencia al choque
15-Ce	0,0004	0,051	0,046		
16-VI-I	0,616	0,509	0,011	2,8E-19	0,667
18-VI-II	0,875	0,260	0,135	2,4E-27	0,563
27-Tr	0,523	0,281	0,993	1,9E-21	0,875
31-BI2	0,628	0,982	0,123	3,7E-20	0,567
31-BI3	0,186	1,6E-07	0,095	2,4E-23	0,758

■ TABLA V. 14D

Valores de H_0 en las bioesparitas

Material	Resistencia compresión	Resistencia flexión	Flexión tras heladicidad	Desgaste por abrasión
20-Mi	0,0053	0,0004	0,502	0,237
21-Cv1	0,148	1,1E-05	0,0009	0,895
21-Cv2	0,482	0,0002	0,012	0,381
22-Ig	0,392	0,24	0,105	0,790
26-No	0,522	0,013		0,057
19-To	3,0E-06	1,6E-06		

En general, las rocas carbonatadas caracterizadas tienen un comportamiento isótropo respecto al ensayo de resistencia mecánica a compresión, siendo únicamente las calizas de Mirambel (20-Mi), Torre Villoros (19-To), Cuevas (15-Ce) y Mosqueruela (24-Mq24) las que presentan un comportamiento anisótropo. Respecto al ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, el único material que muestra un comportamiento anisótropo es la caliza de Mosqueruela (23-Mq1). Para estas rocas, los valores mínimos obtenidos quedan englobados en los valores medios de tipos rocosos semejantes a ellos.

Respecto al ensayo de flexión, los resultados globales obtenidos indican que las rocas recristalizadas muestran un comportamiento isótropo frente a este ensayo, mientras que las bioesparitas y las biomicitas presentan un comportamiento preferentemente anisótropo.

Los resultados del ensayo de flexión tras heladicidad son muy variables, originándose cambios en el comportamiento de los materiales de isótopos a anisótopos y viceversa.

Todas las rocas caracterizadas que presentan un uso principal como roca ornamental poseen un comportamiento isótropo respecto a los ensayos de resistencia al choque y de resistencia a la compresión uniaxial y un comportamiento anisótropo respecto al ensayo de microdureza Knoop. Dada la importancia de la resistencia al choque a la hora de caracterizar un material para su uso como pavimento y/o revestimiento, es destacable el comportamiento isótropo que presentan todas las rocas con uso ornamental; evitando de esta manera problemas por la inadecuada orientación del material, bien en el proceso de elaboración del producto final, o bien durante su colocación.

V.3.4. ADECUACIÓN DE USO

El conocer las propiedades físicas y mecánicas de un material pétreo es un requisito previo e indispensable para el correcto uso de la piedra natural. Los ensayos de caracterización tecnológica son las herramientas que permiten obtener datos objetivos de las propiedades del

material a lo largo de su vida útil y evaluar su posible idoneidad en función del uso al que vaya a estar destinado.

Todos los materiales pétreos pueden ser utilizados como material de usos constructivos, pero un buen uso de los mismos requiere conjugar sus características tecnológicas, la función requerida y las características del emplazamiento. Por ello, la selección del material atendiendo a parámetros estéticos y no tecnológicos suele conducir a problemas en el mismo tras su puesta en obra que, en la mayoría de las ocasiones son de difícil solución. Otro factor de gran importancia para el correcto comportamiento del material tras su puesta en obra es su colocación. Sin embargo, este factor no se trata en esta tesis doctoral, la cual esta dedicada a la caracterización de materiales de usos constructivos.

Con los resultados obtenidos a partir de los diferentes ensayos tecnológicos se ha realizado una caracterización tecnológica del material y se han propuesto las sugerencias de uso más idóneo. Esta adecuación de uso se ha completado con la evaluación de la resistencia a flexión tras heladicidad, con el objeto de establecer recomendaciones de uso en ambientes específicos.

Los principales usos para los que es destinada la piedra natural explotada en Aragón son: pavimentación (exterior e interior), revestimiento (exterior e interior), mampostería y, en menor medida, decoración y trabajos de arte y arte funerario.

En la tabla V-15 se enumeran los ensayos principales para caracterizar la piedra natural para su uso en revestimiento, pavimento y mampostería. Los usos de decoración, mobiliario del hogar y trabajos de arte y arte funerario presentan unos requerimientos específicos para cada caso dependiendo de su posición y función.

El ensayo de carga de rotura por anclajes no se ha incluido en la presente tesis doctoral, porque cuando se diseñaron las tandas de ensayos en el año 2003 no se estimó conveniente su inclusión por el escaso uso de las piedras comercializadas en Aragón en fachadas ventiladas. El espectacular desarrollo que ha tenido lugar en el sector de la Piedra Natural en los últimos 5 años y los nuevos usos que se están desarrollando hacen muy importante la realización de este ensayo, por lo que ha sido incluido en la tabla V-15 aunque no tengamos resultados del mismo.

A continuación, se exponen los resultados para cada uno de los ensayos realizados y la interpretación de los mismos según las normas UNE vigentes y de las recomendaciones de uso en función de las propiedades tecnológicas.

■ TABLA V. 15

Cuadro resumen con los ensayos tecnológicos principales en función del uso de la Piedra Natural

Ensayo	Revestimiento		Pavimento		Mampostería
	Interior	Exterior	Interior	Exterior	
Estudio petrográfico					
Absorción					
Porosidad abierta					
Resistencia compresión					
Resistencia flexión					
Resistencia al choque					
Resistencia al desgaste					
Resistencia deslizamiento					
Microdureza Knoop					
Resistencia a las heladas					
Resistencia al anclaje					
Ensayos alterabilidad					

V.3.4.1. Estudio petrográfico

El estudio petrográfico de la Piedra Natural permite determinar los componentes mineralógicos de la roca, así como las características texturales de la misma. Estos parámetros controlan en gran medida el comportamiento químico, físico y mecánico de la Piedra Natural y permiten su correcta clasificación. Las características petrográficas que permiten realizar una caracterización tecnológica del material y que condicionan su comportamiento tras su puesta en obra son: porosidad, tipos de contacto, tamaño medio, selección, mineralogía, composición, porcentaje de componentes y discontinuidades. Además, el estudio petrográfico permite detectar la presencia de posibles minerales inestables, zonas de debilidad mecánica y determinar la alterabilidad potencial del material.

La descripción petrográfica detallada de cada roca se ha expuesto en las fichas petrográficas.

Discusión y resultados

Mediante el estudio petrográfico se ha realizado una clasificación en 8 grupos de las rocas caracterizadas en función de sus características petrográficas.

- Arenitas <5%: arenitas con porosidad inferior al 5%: 1-Ye, 2-Ma, 3-En, 4-Hu, 5-Pa y 11-Ta.
- Arenitas >5%: arenitas con porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.
- Biomicritas <3: biomicritas/Pelmicritas con porosidad inferior al 3%: 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 14-AI, 23-Mq1, 24-Mq21-22-23-24, 25-Pm, 28-Crt y 29-A.
- Biomicritas >10: biomicritas con porosidad superior al 10%: 8-Tu y 9-Fr.
- Bioesparitas <3: bioesparitas con porosidad inferior al 3%: 22-Ig, 26-No y 21-Cv1-2.
- Bioesparitas >3: bioesparitas con porosidad superior al 3%: 19-To y 20-Mi.
- Rocas carbonatadas recristalizadas calcíticas: 15-Ce, 16-VI-I, 17-CFI-CFS, 18-VI-II y 27-Tr.
- Rocas carbonatadas recristalizadas dolomíticas: 30-D y 31-BI1-2-3.

V.3.4.2. Absorción y porosidad

La determinación de la absorción y de la porosidad abierta es especialmente importante para aquellos materiales que van a ser utilizados en exterior. Una mayor absorción del material implica una mayor susceptibilidad del mismo a la degradación por los mecanismos de hielo-deshielo en lugares húmedos y con oscilaciones térmicas habituales por encima y debajo de los 0°C, así como por procesos de cristalización de sales.

Discusión y resultados

No existe una relación directa entre absorción y/o porosidad abierta con el deterioro del material en función de las condiciones atmosféricas, dado que el efecto de los procesos de deterioro asociados al agua depende del tipo y de la distribución de tamaños de poros más que de la porosidad total del material.

Debido a la mayor susceptibilidad a la alteración de los materiales con elevada porosidad es recomendable la utilización de materiales pétreos con bajos porcentajes de porosidad. Todas las rocas caracterizadas presentan unos valores de porosidad total inferiores al 25%, presentando la gran mayoría valores de porosidad abierta inferiores al 5%. López G. Mesones (2000) recomienda unos valores de porosidad total inferiores al 45% para usos del material en la construcción de muros. Según esta recomendación todas las rocas caracterizadas serían aptas para su uso en construcción de muros.

V.3.4.3. Resistencia a compresión uniaxial

El ensayo de resistencia a la compresión uniaxial es un ensayo básico para evaluar la aptitud de un material para su uso tanto en pavimento, revestimiento o mampostería.

Discusión y resultados

A) Pavimentación

Los valores mínimos recomendados de resistencia mecánica a compresión de un material pétreo para su uso en pavimentos dependen de las características del tráfico (Cerdeño *et al.*, 2007).

Resistencia compresión	Uso
Grupo 1: > 55 MPa	Circulación de vehículos pesados
Grupo 2: 40-55 MPa	Tránsito de vehículos ligeros
Grupo 3: 30-40 MPa	Tránsito peatonal

Grupo 1. Rocas con resistencia mecánica superior a 55 MPa

Arenitas <5%: 1-Ye, 2-Ma, 3-En, 4-Hu, 5-Pa, 11-Ta.

Biomicitas <3%: 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 14-Al, 23-Mq-1, 24-Mq21-22-23-24, 25-Pm, 28-Crt, 29-A.

Bioesparitas <3%: 21-Cv1-2, 22-Ig, 26-No.

Rocas carbonatadas recristalizadas dolomíticas: 31-BI1-2-3.

Grupo 2. Rocas con resistencia mecánica comprendida entre 40 y 55 MPa

Arenitas >5%: 6-Un, 7-Ay.

Biomicitas >10%: 8-Tu, 9-Fr.

Bioesparitas >3%: 19-To, 20-Mi.

Rocas carbonatadas recristalizadas calcíticas: 16-VI-I, 18-VI-II, 27Tr.

Grupo 3. Rocas con resistencia mecánica comprendida entre 30 y 40 MPa

Arenitas >5%: 10-Az.

Rocas carbonatadas recristalizadas calcíticas: 15-Ce.

Las rocas recristalizadas dolomíticas, biomicitas con porosidad inferior al 3%, bioesparitas con porosidad inferior 3% y arenitas con porosidad inferior al 5% alcanzan los valores mayores de resistencia mecánica a compresión y cumplen los requerimientos necesarios para su uso en zonas de tránsito de vehículos pesados.

Las bioesparitas con porosidad superior al 3%, biomicitas con porosidad superior al 10%, rocas recristalizadas calcíticas (salvo 15-Ce) y rocas areníticas con porosidad superior al 5% (salvo 10-Az) presentan valores de resistencia mecánica a compresión comprendidos entre 55 y 40 MPa y cumplen la solicitud para su uso en zonas con tráfico de vehículos ligeros.

Todas las rocas caracterizadas en el presente trabajo son aptas para su uso en zonas con tránsito peatonal.

B) Mampostería

López G. Mesones (2000) recomienda un valor mínimo de resistencia mecánica a compresión de la piedra natural de 20 MPa para su uso en mampostería.

Todas las rocas caracterizadas presentan una resistencia mayor a estos 20 MPa, por lo que según esta recomendación podrían considerarse aptas para su uso en mampostería.

V.3.4.4. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión es un ensayo importante para evaluar la idoneidad de uso de un material para su uso en pavimento, revestimiento y mampostería. En función de las cargas de rotura requeridas según los diferentes usos del material se establece el espesor mínimo requerido para su uso.

En soluciones de fachada, el conocimiento del comportamiento a flexión es muy importante, debido a que la acción del viento, mediante presiones y succiones, hará que el aplacado de fachada deba soportar, apoyado única y muy puntualmente en los anclajes, momentos flectores significativos.

La norma europea UNE-EN 1341:2002 para pavimentos recomienda los siguientes valores de cargas de rotura requeridas según usos:

P(kN)	Usos
No requiere	Decoración
0,75	Baldosa sobre mortero. Áreas peatonales.
3,5	Áreas peatonales y para bicicletas. Jardines y balconadas.
6	Accesos ocasionales de coches, vehículos ligeros y motocicletas.
9	Aceras, áreas comerciales con paso ocasional de vehículos.
14	Áreas peatonales usadas frecuentemente por vehículos pesados.
25	Carreteras, calles y gasolineras.

Como ejemplo para el cálculo de los espesores mínimos de estas rocas en función del uso, se ha tomado el tamaño medio de baldosa comercial para pavimentación exterior (tabla V-16).

Discusión y resultados

Para estas baldosas tipo, se ha realizado una clasificación del material atendiendo a su espesor mínimo para cumplir las solicitaciones necesarias para su uso en carreteras, calles y gasolineras siguiendo un criterio de elaboración propio con el objetivo de establecer una comparación entre la resistencia a flexión de los diferentes materiales.

Grupo 1. Materiales que requieren un espesor menor de 7 cm.

Arenitas <5%: 1-Ye, 2-Ma, 3-En, 4-Hu, 5-Pa.

Biomicrocritas <3%: 13-Pu, 23-Mq1.

Rocas carbonatadas recristalizadas calcílicas: 15-Ce.

Grupo 2. Materiales que requieren un espesor comprendido entre 7 y 10 cm.

Arenitas <5%: 11-Ta.

Biomicrocritas <3%: 12-Ca1-2-3, 14-Al, 24-Mq21-22-23-24, 25-Pm, 28-Crt, 29-A.

Bioesparitas <3%: 21-Cv1-2, 22-Ig, 26-No.

Bioesparitas >3%: 19-To.

Grupo 3. Materiales que requieren un espesor comprendido entre 10 y 15 cm.

Biomicrocritas >10%: 8-Tu, 9-Fr.

Bioesparitas >3%: 20-Mi.

Rocas carbonatadas recristalizadas calcílicas y dolomíticas: 16-VI-I, 18-VI-II, 27-Tr, 31-BI1-2-3.

Grupo 4. Materiales que requieren un espesor mayor de 15 cm.

Arenitas >5%: 6-Un, 7-Ay, 10-Az.

Las rocas areníticas con porosidad inferior al 5% y las biomicritas con porosidad inferior al 3% poseen los valores más elevados de resistencia mecánica a la flexión, mientras que las biosparitas con porosidad inferior al 3% presentan valores intermedios. En general, las rocas recristalizadas, las biomicritas con porosidad superior al 10% y las arenitas con porosidad superior al 5% presentan los valores más bajos de resistencia mecánica a flexión.

■ TABLA V. 16

Espesor mínimo requerido (cm) para una baldosa de 80X40 cm para cada una de las rocas caracterizadas en función del uso

Material	Resistencia Flexión MPa	P(kN)25	P(kN)14	P(kN)9	P(kN)6	P(kN)3	P(kN)0,75
		Espesor cm.					
15-Ce	31,00	6,22	4,66	3,73	3,05	2,16	1,08
1-Ye	28,30	6,51	4,87	3,91	3,19	2,26	1,13
4-Hu	27,62	6,59	4,93	3,95	3,23	2,28	1,14
5-Pa	26,99	6,67	4,99	4,00	3,27	2,31	1,15
2-Ma	26,80	6,69	5,01	4,01	3,28	2,32	1,16
23-Mq-1	25,81	6,82	5,10	4,09	3,34	2,36	1,18
3-En	25,09	6,92	5,18	4,15	3,39	2,40	1,20
13-Pu	24,64	6,98	5,22	4,19	3,42	2,42	1,21
24-Mq22	24,26	7,03	5,26	4,22	3,45	2,44	1,22
12-Ca1	23,04	7,22	5,40	4,33	3,54	2,50	1,25
12-Ca3	20,79	7,60	5,69	4,56	3,72	2,63	1,32
12-Ca2	18,92	7,96	5,96	4,78	3,90	2,76	1,38
11-Ta	18,11	8,14	6,09	4,88	3,99	2,82	1,41
21-Cv1	17,82	8,21	6,14	4,92	4,02	2,84	1,42
21-Cv2	17,77	8,22	6,15	4,93	4,03	2,85	1,42
24-Mq21	17,58	8,26	6,18	4,96	4,05	2,86	1,43
26-No	17,56	8,27	6,19	4,96	4,05	2,86	1,43
19-To	15,90	8,69	6,50	5,21	4,26	3,01	1,50
28-Crt	15,59	8,77	6,57	5,26	4,30	3,04	1,52
24-Mq24	15,51	8,80	6,58	5,28	4,31	3,05	1,52
24-Mq23	14,53	9,09	6,80	5,45	4,45	3,15	1,57
22-Ig	13,88	9,30	6,96	5,58	4,56	3,22	1,61
14-Al	13,74	9,35	6,99	5,61	4,58	3,24	1,62
29-A	12,04	9,98	7,47	5,99	4,89	3,46	1,73
25-Pm	11,95	10,02	7,50	6,01	4,91	3,47	1,74
31-BI3	11,76	10,10	7,56	6,06	4,95	3,50	1,75
31-BI-1	11,36	10,28	7,69	6,17	5,04	3,56	1,78
9-Fr	9,65	11,15	8,34	6,69	5,46	3,86	1,93
16-VI-I	9,55	11,21	8,39	6,73	5,49	3,88	1,94
27-Tr	9,52	11,23	8,40	6,74	5,50	3,89	1,94
31-BI-2	8,80	11,68	8,74	7,01	5,72	4,05	2,02
18-VI-II	8,49	11,89	8,90	7,13	5,82	4,12	2,06
20-Mi	6,85	13,24	9,90	7,94	6,48	4,58	2,29
8-Tu	6,10	14,03	10,50	8,42	6,87	4,86	2,43
7-Ay	4,90	15,65	11,71	9,39	7,67	5,42	2,71
10-Az	4,61	16,13	12,07	9,68	7,90	5,59	2,79
6-Un	3,24	19,25	14,40	11,55	9,43	6,67	3,33

V.3.4.5. Heladicidad

La evaluación de la durabilidad de estos materiales se ha realizado mediante la valoración de los cambios que tienen lugar en la resistencia mecánica a flexión antes y después de los ciclos de heladicidad, siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 12372. Este ensayo permite valorar si el valor residual de resistencia obtenido para un tipo litológico determinado es el adecuado para cumplir las sollicitaciones mecánicas que le son requeridas tras su puesta en obra. Este es un criterio objetivo para la aceptación o rechazo de un material para su uso en exteriores en zonas relativamente húmedas y con climas fríos.

La acción de los ciclos de hielo-deshielo sobre la Piedra Natural induce una teórica degradación que afecta en mayor o menor medida a su vida útil. Esta degradación es consecuencia del aumento de volumen del agua líquida en un 9% por congelación a temperaturas inferiores a 0°C y a la fatiga que suponen los sucesivos ciclos de hielo-deshielo.

Discusión y resultados

La norma UNE-EN 1341:2002 considera resistentes frente a la heladicidad a aquellas rocas que presentan una disminución en su resistencia a flexión tras heladicidad inferior al 20% de la resistencia a flexión del material inalterado.

En función de los resultados obtenidos las rocas caracterizadas se han agrupado en 2 grupos:

Grupo I. Rocas no heladizas. Materiales en los que la resistencia a flexión tras heladicidad aumenta o disminuye menos del 20%

Arenitas <5%: 2-Ma, 3-En, 4-Hu, 5-Pa, 11-Ta.

Arenitas >5%: 6-Un, 7-Ay, 10-Az.

Biomicrocritas <3%: 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 14-Al, 23-Mq1, 24-Mq21-24, 28-Crt.

Biomicrocritas >10%: 9-Fr.

Bioesparitas <3%: 21-Cv1-2, 22-Ig, 25-Pm.

Bioesparitas >3%: 19-To, 20Mi.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 18-VI-II, 27-Tr, 31-BI2-3.

Grupo II. Rocas heladizas. Materiales en los que disminuye la resistencia a flexión tras heladicidad más del 20%.

Biomicrocritas <3%: 24-Mq23.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 16-VI-I, 15-Ce.

Los resultados del ensayo indican que los únicos materiales heladizos serían las rocas carbonatadas recristalizadas 16-VI-I y 15-Ce y la biomicrocrita 24-Mq23.

Las rocas carbonatadas recristalizadas presentan un comportamiento variable respecto al ensayo de heladicidad, siendo no heladizas las rocas de composición dolomítica y las calizas travertínicas macroporosas. Por el contrario, son heladizas los carbonatos calcíticos recristalizados no macroporosos (16-VI-I y 15-Ce).

Dentro del grupo de las biomicrocritas, únicamente es heladiza una de las variedades de 24-Mq. De esta roca se han caracterizado 4 variedades siendo heladiza únicamente la variedad 24-Mq23. El estudio petrográfico indica que no existen diferencias texturales importantes entre ellas, siendo la única diferencia existente la proporción de sus constituyentes. La variedad 24-Mq23 presenta, a diferencia de las otras variedades, una relación matriz/aloquímicos elevada (2,16) siendo de 0,75 en Mq-21, 0,76 en Mq-22 y de 1,02 en Mq-24.

Los resultados obtenidos indican que en gran parte de las rocas caracterizadas tiene lugar un importante aumento en la resistencia a flexión tras heladicidad como consecuencia de los ciclos de hielo-deshielo. Este fenómeno indica una interpretación problemática del ensayo. El ensayo de heladicidad presenta una utilidad cuestionada con las normas actuales consecuencia del bajo número de ciclos de hielo/deshielo requeridos.

Idoneidad de uso en pavimentación y revestimiento de las variedades pétreas utilizadas preferentemente como roca ornamental.

V.3.4.6. Resistencia al choque

La resistencia al choque es un ensayo importante para evaluar la idoneidad de uso de un material en pavimentación y revestimiento por el riesgo de su rotura por impactos. García *et al.*, 2001 propone una adecuación de uso en función de la energía de rotura por impacto.

Usos	E_f (Julios)
Pavimentos exteriores y edificios públicos	≥ 3
Revestimientos en exteriores, paredes verticales, pavimentos interiores de viviendas	$\geq 2,5$
Revestimientos en interiores en viviendas particulares	≥ 2

1 Julio es el equivalente a la caída de una masa de 1kg desde una altura de 10,2 cm. La energía de rotura ha sido calculada para probetas de 3cm de espesor.

Discusión y resultados

Grupo 1. Energía de rotura mayor de 3 Julios

Biomicrocritas <3%: 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 28-Crt.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 18-VI-II, 27-Tr, 31-BI3.

Grupo 2. Energía de rotura comprendida entre 2,5 y 3 Julios.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 16-VI-I, 31-BI2.

V.3.4.7. Resistencia al desgaste por rozamiento

Este ensayo informa sobre la resistencia al desgaste de la Piedra Natural y permite evaluar el desgaste que presentará el material. Regueiro (2005), diferencia tres tipos de usos en función de la resistencia al desgaste por rozamiento de la piedra natural.

Uso	Desgaste por rozamiento
Colectivo intenso	0-2,5 mm
Colectivo moderado	2,5-8 mm
Individual	> 8 mm

Discusión y resultados

Grupo 1. Desgaste por rozamiento inferior a 2,5 mm.

Biomicrocritas <3%: 28-Crt

Rocas carbonatadas recristalizadas: 31-BI3.

Grupo 2. Desgaste por rozamiento comprendido entre 2,5 y 8 mm.

Biomicrocritas <3%: 12-Ca1-2-3, 13-Pu.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 16-VI-I, 18-VI-II, 27-Tr, 31-BI2.

V.3.4.8. Microdureza Knoop

Este ensayo informa sobre la durabilidad del pulido y la cohesión superficial en una roca ornamental y es un ensayo indicado para materiales utilizados en pavimentación exterior. Regueiro (2005) diferencia tres grupos de materiales en función de su microdureza Knoop.

Microdureza Knoop baja	< 1000 Mpa
Microdureza Knoop media	1000-2500 Mpa
Microdureza Knoop alta	> 2500 Mpa

Discusión y resultados

Grupo 1. Microdureza Knoop media.

Biomicrocritas <3%: 12-Ca1, 13-Pu.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 31-BI3, 18-VI-II.

Grupo 2. Microdureza Knoop Baja.

Biomicrocritas <3%: 12Ca-1,2, 28-Crt.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 16-VI-I, 27-Tr, 31-BI2.

Discusión de los resultados obtenidos para el uso de las rocas ornamentales en pavimentación y revestimiento.

Según el ensayo de resistencia al choque todas las rocas ornamentales caracterizadas serían aptas para ser utilizadas como revestimiento en interior y exterior y para pavimentación en interior de viviendas y, salvo 18-VI-II y 31-BI2, para ser utilizadas en pavimentos exteriores.

El ensayo de resistencia al desgaste por rozamiento indica que 28-Crt y 31-BI3 serían aptas para pavimento con usos colectivos intensos, mientras que el resto serían únicamente aptas para pavimentos en zonas con usos colectivos moderados. La mayor resistencia al desgaste por rozamiento de 28-Crt, dentro de las biomicrocritas, se debe a la baja relación entre granos carbonatados y granos de cuarzo.

Idoneidad de uso en pavimentación de las variedades pétreas utilizadas preferentemente como piedra de cantería y/o lajas.

V.3.4.9. Resistencia al deslizamiento

Este ensayo analiza el rozamiento de la superficie de la roca para determinar hasta que punto inhibe la formación de una superficie deslizante. El documento básico de seguridad de utilización SU1 (seguridad frente al riesgo de caídas) del CTE (código técnico de la edificación) establece una clasificación de los pavimentos en función de su resistencia al deslizamiento USRV. En los posibles usos del material se indica la clase que debe presentar como mínimo el material en función de su uso.

Valor USRV	Clase	Usos
USRV<15	0	
15<USRV≤35	1	Zonas interiores secas con pendiente < 6%
35<USRV≤45	2	Zonas interiores secas con pendiente > 6% y escaleras Zonas interiores húmedas con pendiente < 6%
USRV>45	3	Zonas interiores húmedas con pendiente > 6% y escaleras Zonas interiores donde pueda haber otros agentes como grasas, aceites. Etc. Zonas exteriores

Discusión y resultados

Clase 3. Valores de USRV superiores a 45

Arenitas <5%: 2-Ma, 3-En, 4Hu, 5-Pa, 11-Ta.

Arenitas >5%: 6-Un, 7-Ay, 10-Az.

Biomicrocritas <3%: 14-Al, 23-Mq1.

Biomicrocritas >3%: 9-Fr.

Bioesparitas <3%: 22-Ig.

Bioesparitas >3%: 19-To, 20-Mi.

Clase 2. Valores de USRV comprendidos entre 45 y 35

Biomicrocritas <3%: 24-Mq22.

Bioesparitas <3%: 19-No, 21-Cv1-2.

Clase 1. Valores de USRV inferiores a 35

Biomicrocritas <3%: 24-Mq21-23-24, 25-Pm.

V.3.4.10. Resistencia al desgaste por abrasión

Este ensayo informa sobre la resistencia al desgaste de la piedra y permite evaluar el desgaste que presentará el material. López G. Mesones (2000) recomienda unos valores máximos de la anchura de la huella en función del uso al que va a ser destinado el material.

Uso	Anchura máxima de la huella
Colectivo intenso y escaleras para tráfico colectivo	18 mm
Colectivo moderado	23 mm
Individual	28 mm
Valores mayores que los límites recomendados	>28 mm

Discusión y resultados

Grupo 1. Rocas con anchura máxima de la huella de 18 mm

Biomicrocritas <3%: 25-Pm.

Arenitas <5%:4-Hu.

Grupo 2. Rocas con anchura máxima de la huella de 23 mm

Arenitas <5%: 2-Ma, 5-Pa, 11-Ta.

Arenitas >5%: 10-Az.

Biomicrocritas <3%: 23-Mq1, 24-Mq21-22-23-24.

Biomicrocritas >10%: 9-Fr.

Bioesparitas <3%: 22-Ig, 26-No, 21Cv1-2.

Bioesparitas >3%: 19-To.

Grupo 3. Rocas con anchura máxima de la huella de 28 mm

Arenitas <5%:3-En.

Biomicrocritas <3%: 14-Al.

Bioesparitas >3%: 20-Mi.

Grupo 4. Rocas con anchura máxima de la huella > de 28 mm

Arenitas >5%: 6-Un, 7-Ay.

Discusión de los resultados obtenidos para el uso de las piedras de cantería y lajas en pavimentación.

Todas las rocas caracterizadas serían aptas para su uso en pavimentación según el valor de resistencia al deslizamiento (USRV), variando el tipo de uso en función de los valores obtenidos. Los valores mayores de resistencia al deslizamiento corresponden a las arenitas (independientemente de su porosidad), biomicritas con porosidad superior al 10% y bioesparitas con porosidad superior al 3%.

Los resultados del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión muestran una importante diferencia de comportamiento dentro del grupo de las arenitas.

Grupo arenitas con porosidad superior al 5%: Los valores de resistencia al desgaste por abrasión de 10-Az indican que es una roca apta para su uso en zonas colectivas, mientras que los valores de resistencia al desgaste por abrasión en las arenitas de 7-Ay y 6-Un son superiores a los límites recomendados para su uso en pavimentación. Las tres rocas presentan valores similares en el resto de los resultados de los ensayos mecánicos, presentando únicamente diferencias importantes en su composición mineralógica. El mejor comportamiento de 10-Az frente a este ensayo es consecuencia de su baja relación calcita/dolomita y calcita/cuarzo.

	6-Un	7-Ay	10-Az
Desgaste por abrasión (mm)	31,50	42,00	19,00
Relación calcita/cuarzo	2,84	0,73	1,11
Relación calcita/dolomita	41,35	14,40	3,43

Grupo arenitas con porosidad inferior al 5%: Todas las arenitas con porosidad inferior al 5%, excepto la arenita de 3-En, presentan unos resultados adecuados para un uso colectivo. Al igual que en el caso de las arenitas del Valle del Ebro, la principal diferente entre estas rocas es su composición mineralógica. La menor resistencia al desgaste por abrasión de la arenita 3-En respecto al resto de las arenitas eocenas se debe a su elevada relación calcita/dolomita y calcita/cuarzo.

	2-Ma	3-En	4-Hu	5-Pa	11-Ta
Desgaste por abrasión (mm)	20	24,5	18	21	22
Relación calcita/cuarzo	1,37	3,13	2,63	0,27	0,32
Relación calcita/dolomita	6,34	15,67	6,68	2,00	0,00

VI. Caracterización petrofísica de la roca fresca

VI.1. Introducción

Los materiales recogidos en esta parte de la investigación han sido seleccionados bien por ser los más característicos del patrimonio arquitectónico aragonés, o bien por ser ampliamente utilizados como materiales de construcción en la actualidad. Las rocas seleccionadas son 15 rocas carbonatadas y 3 rocas detríticas que pertenecen a las 40 rocas caracterizadas en los capítulos precedentes:

Biomicrocritas-Pelmicrocritas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A.

Biomicrocritas porosidad superior al 10%: 8-Tu y 9-Fr.

Rocas recristalizadas carbonatadas (porosidad 3-10%): 16-VI-I, 17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II, 27-Tr, 30-D, 31-BI1, 31-BI2 y 31-BI3.

Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

Con el objeto de facilitar la identificación de las rocas pertenecientes a cada uno de los 4 grupos diferenciados, se ha establecido la siguiente leyenda de color para su uso en las tablas de los capítulos VI, VII y VIII:

Clasificación

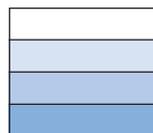
Biomicrocritas porosidad superior al 10%.

Biomicrocritas-Pelmicrocritas porosidad inferior al 3%.

Rocas recristalizadas carbonatadas (porosidad 3-10%)

Arenitas porosidad superior al 5%.

Color



Una roca desde el punto petrofísico se puede definir como "un agregado discretamente homogéneo, con una composición mineralógica formalmente definida, que junto con el espacio poroso y los posibles fluidos que lo pueden ocupar van a definir el comportamiento de la roca" (Ordóñez, 1996).

El estudio petrofísico de las rocas permite interpretar las propiedades físicas en función de sus componentes y características petrográficas (mineralogía, porosidad, textura, fisuras, uniones intergranulares, presencia de anisotropías, minerales, incluyendo su estado de alteración físico y químico, composición química, etc.) (Montoto, 1983).

La interpretación petrográfica de las propiedades físicas en las rocas es compleja, ya que son sólidos poco homogéneos, polifásicos, con abundantes discontinuidades y anisotropías (Montoto *et al.*, 1999). Por ello, las correlaciones petrofísicas son difíciles de interpretar y de generalizar.

El comportamiento hídrico de una roca depende principalmente de las características petrográficas (mineralogía y textura) y del tipo y configuración de su espacio poroso (Esbert y Ordaz, 1985; Alonso *et al.*, 1987). Cambios composicionales y/o texturales implican cambios en el comportamiento hídrico del material por la modificación del sistema poroso.

Los espacios vacíos –poros y fisuras– son un componente esencial de una roca, ya que en gran medida su volumen y distribución condicionan su alterabilidad y/o durabilidad (Montoto, 1983; Alonso, 1986), así como su comportamiento físico y mecánico. Por ello, es un aspecto fundamental conocer el sistema poroso de una roca. Las principales características necesarias para caracterizar el sistema poroso de un material pétreo son su volumen, distribución de tamaños de poro, morfología de los mismos y la conexión de las diferentes familias porométricas entre sí.

La porosidad se define como la relación en porcentaje entre el volumen de poros (abiertos y cerrados) y el volumen aparente de la probeta.

- Según criterios genéticos se diferencian dos tipos de porosidad en las rocas sedimentarias: porosidad primaria y porosidad secundaria.
- Según el grado de interconexión entre los poros se diferencian dos tipos de porosidad: porosidad abierta y porosidad cerrada.

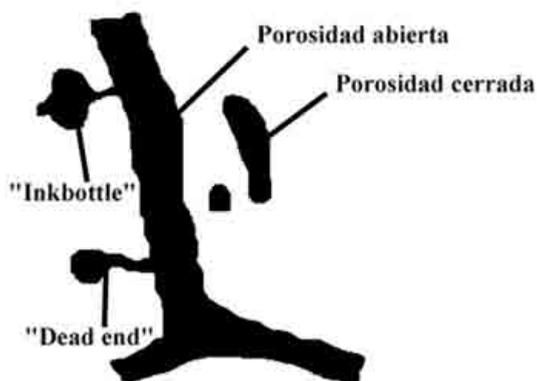
La porosidad abierta de una roca se define como el volumen de poros presentes en un material pétreo que están conectados entre sí, permitiendo el flujo de diferentes fluidos por todo el volumen del material. Dentro de los poros que conforman la porosidad abierta pueden diferenciarse poros conectados entre sí por capilares que permiten un flujo eficaz de los fluidos, poros conectados al sistema poroso por estrechos capilares en los que normalmente el agua únicamente puede penetrar bajo condiciones de fuertes presiones o vacío "inkbottle" o "cuellos de botella" y poros que están conectados con el sistema poroso únicamente por un lado quedando el otro extremo del poro cerrado y sin conexión "dead end" o "culos de saco".

La porosidad cerrada de una roca se define como el volumen de poros que no están conectados, ni con el resto de la porosidad, ni con el exterior y, por lo tanto, por ellos no circulará ningún tipo de fluido.

La porosidad total de una roca es la compuesta por todos los espacios vacíos del material pétreo incluyendo tanto la porosidad abierta como la porosidad cerrada (figura VI-1).

■ FIGURA VI.1

**Porosidad abierta y porosidad cerrada en una representación en 2D
(modificada de Bourgès, 2006)**



Ambas porosidades influyen en el comportamiento físico, mecánico y químico del material pétreo, pero sólo la porosidad abierta tiene incidencia en la alteración química del material, dado que la porosidad cerrada no contribuye a la circulación de fluidos por su interior.

- Según el tamaño medio de acceso de poro se diferencian dos tipos de porosidad: macroporosidad y microporosidad.

En la literatura científica existen diferentes clasificaciones en función del tamaño de los poros. Dentro de los estudios de caracterización de Piedra Natural, los límites entre las diferentes clases porométricas suelen establecerse en función de las limitaciones de las técnicas con las que se ha realizado el estudio. En este trabajo se ha seguido la clasificación propuesta por Riganti *et al.*, (1981), Pellerin, (1980) y Alonso *et al.*, (1987) la cual se basa en los datos obtenidos por la técnica de porosimetría de inyección de mercurio. En la presente tesis doctoral, se define como macroporosidad el volumen de poros con radios de acceso superiores a 7,5 μm y como microporosidad el volumen de poros con radio de acceso inferiores a 7,5 μm .

Las rocas detríticas, en general, presentan una geometría de su sistema poroso menos compleja que en el caso de las rocas carbonatadas. Las características principales del sistema poroso en las rocas carbonatadas son función del ambiente deposicional y de los procesos diagenéticos. La clasificación más simple y extendida para los poros en las rocas carbonatadas es la propuesta por Choquette y Pray (1970). Esta clasificación se basa en cuatro elementos: 1) tipos básicos de porosidad; 2) tiempo y origen de la misma; 3) tamaño y forma de poro; y 4) abundancia.

La porosidad presente en las rocas sedimentarias se puede clasificar en cuatro grupos:

- **Porosidad intergranular o interpartícula.**

Porosidad primaria creada durante la sedimentación, compuesta por los espacios vacíos existentes entre las diferentes partículas que forman el sedimento. Esta suele disminuir durante la diagénesis como consecuencia de los procesos físicos-químicos que tienen lugar. Esta porosidad está presente tanto en las rocas detríticas como en los carbonatos aloquímicos.

- **Porosidad intercrystalina.**

Es la porosidad localizada entre los cristales, tanto de cemento como entre los cristales procedentes de procesos de recristalización.

- **Porosidad intragranular o intrapartícula.**

Es la porosidad localizada dentro de los granos y partículas. Suele originarse por cambios mineralógicos y procesos de disolución-precipitación.

- **Porosidad de fractura.**

Es la porosidad resultado de la deformación tectónica, procesos de expansión por cambios térmicos o presiones anisótropas.

El transporte de agua en el interior del sistema poroso de los materiales pétreos depende del contenido en agua y del tamaño de poro (Meng, 1993; Fitzner 1994).

Cuando la humedad relativa es inferior al 65% el agua es adsorbida en las paredes de los poros y el transporte se produce por difusión en estado gaseoso. Para valores de humedad relativa superiores los capilares comienzan a llenarse de agua y se crean en el interior del material regiones saturadas que pueden llegar a coalescer con el aumento progresivo de la humedad. En esta situación, el transporte de agua tiene lugar en estado líquido y es controlado por diferentes fuerzas en función del tamaño de los poros por los que discurre (Fort, 1996), destacando tres mecanismos principales de movimiento de agua: adsorción, capilaridad y gravedad.

- El transporte de agua por adsorción tiene lugar principalmente en los poros de menor tamaño.

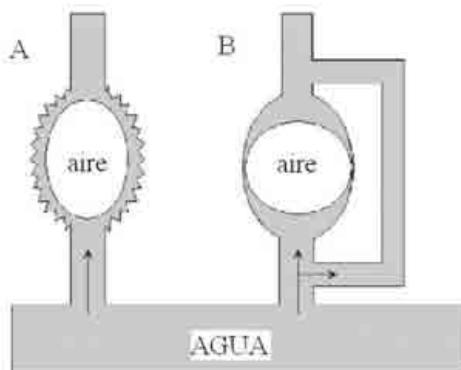
- El transporte de agua por capilaridad tiene lugar principalmente en poros mayores a $0,1 \mu\text{m}$ (Winkler, 1997), siendo el tamaño máximo de poro a partir del cual este mecanismo se puede despreciar de $100 \mu\text{m}$ (Benavente, 2002). Este es el mecanismo más efectivo para el transporte de agua en rocas porosas.
- El transporte de agua por gravedad tiene lugar en todo el espectro porométrico, siendo especialmente destacado en los poros de mayores dimensiones.

El tamaño de los poros y de los cuellos de botella juega un papel importante en la absorción de agua y son los responsables de crear zonas donde el aire queda retenido durante la absorción. La mayor parte de este aire es desplazado delante del avance del frente húmedo y es expulsado. Sin embargo, parte de este aire inicial puede quedar desconectado del sistema poroso y aislado. Con tiempo suficiente el aire atrapado en el interior de un material poroso puede ser eliminado por difusión o convección.

El grado de saturación alcanzado por cada material está relacionado con el cociente entre el tamaño de los poros y de sus capilares. Esta relación es la responsable del aire que queda atrapado en el interior del sistema poroso durante la absorción de agua (Merz, 1991). Bousquie en 1979 propuso dos modelos para explicar el aire atrapado durante la absorción (figura VI-2).

■ FIGURA VI.2

Modelos de aire atrapado durante los procesos de absorción capilar.
a.: rugosity; b.: "bypass" (tomado de Bousquie, 1979)



Modelo A: el agua asciende a través de la superficie rugosa del poro hasta el capilar de la parte superior, induciendo la retención de aire en la parte central del poro.

Modelo B: la diferencia de radio entre el capilar y el poro hace que el flujo de agua a través del poro sea más lento que en el capilar paralelo al poro, induciendo la retención de aire en el interior del poro.

El sistema poroso de estos materiales ha sido caracterizado por técnicas directas e indirectas:

- Las técnicas directas son aquellas que nos permiten observar directamente el espacio poroso. Dentro de este grupo las técnicas utilizadas han sido la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido con la aplicación del análisis digital de imágenes.

- Las técnicas indirectas son aquellas que nos permiten obtener información sobre el sistema poroso del material a través de la medida de propiedades físicas de un fluido determinado (líquido o gas). Los ensayos y técnicas utilizados han sido los ensayos hídricos de absorción, succión capilar y desorción, el cálculo de la densidad real por el método del picnómetro, la medida de la permeabilidad y la porosimetría de inyección de mercurio.

Sin embargo, debido a la complejidad intrínseca del sistema poroso, no es posible cuantificarlo mediante un único método, existiendo variaciones en los resultados de porosidad para una misma muestra en función de la técnica utilizada.

La porosimetría de inyección de mercurio junto con el análisis digital de imágenes han permitido calcular cuantitativamente el tamaño de los poros (acceso de poro) presentes en los materiales, mientras que el ensayo automatizado de absorción y desorción continua, el ensayo de succión capilar y el ensayo de permeabilidad con gas han permitido caracterizar la cinética de transmisión de fluidos en el interior de los materiales pétreos.

VI.2. Análisis petrológico y geoquímico de los materiales

VI.2.1. PETROGRAFÍA

Las características y componentes petrográficos que van a condicionar el comportamiento mecánico y físico de los materiales pétreos de usos constructivos son: textura, incluyendo los espacios vacíos (poros y fisuras), uniones intergranulares, presencia de anisotropías, componentes mineralógicos y su composición química. Aunque, sin duda alguna, el componente que más influye de todos ellos es la porosidad (Montoto *et al.*, 1999). El exhaustivo estudio petrográfico de estos materiales incluyendo mineralogía y análisis textural se ha expuesto en las fichas tecnológicas del capítulo V. A continuación se realiza una síntesis de las características petrográficas más importantes de las variedades pétreas caracterizadas (tablas VI-1 y VI-2), sin incluir los datos relativos a las características principales del sistema poroso que serán descritos en el apartado VI-3.

Discusión y resultados

Rocas detríticas

Las tres arenitas estudiadas muestran unas características petrográficas similares para parámetros tales como porosidad (con valores de porosidad abierta comprendidos entre 9% y 13%), selección (con valores comprendidos entre 1,1 y 1,4), tipos de contactos y angulosidades de sus clastos. Son rocas con un elevado porcentaje de cemento y una proporción de matriz inferior al 5%, con porcentajes del 2-3% de feldespatos e importantes variaciones en el contenido en cuarzo y en el tipo de líticos carbonatados (Buj *et al.*, 2007).

Su sistema poroso, bajo microscopio petrográfico, se puede describir como un conjunto de macroporos unidos entre sí por conductos con un amplio rango de accesos de poro. El sistema poroso de estas arenitas presenta una elevada heterogeneidad como consecuencia de la distribución aleatoria del alto porcentaje de cemento que presentan.

Rocas Carbonatadas

Los resultados del estudio petrográfico en las rocas carbonatadas muestran una amplia variación en sus características petrográficas dado el diferente origen e historia evolutiva de las mismas. El tamaño de sus clastos, así como los porcentajes y tamaño de los ortoquímicos de

■ TABLA VI.1

Composición mineralógica (expresada en porcentaje) y parámetros petrográficos de las rocas detríticas (Q-cuarzo, Fto-feldespató, Ox Fe-Oxidos de hierro)

	Clastos Q (%)	Clastos Fto (%)	Cemento (%)	Matriz-Ox Fe (%)	Fragmentos líticos (%) (Met., cal., dol.)	Tamaño medio clastos (mm)	Porosidad (%)	Selección	Contactos	Angulosidad
6-Un	12,39	2,16	25,38	1,50	58,56 (38,5; 60,0; 1,4)	0,25	10,43	1,1-1,2	Largos, cóncavo-convexos	Subangulosos-subredondeados
7-Ay	29,73	3,29	18,28	4,27	44,43 (48,3; 48,4; 3,3)	0,25	12,63	1,2-1,4	Largos, cóncavo-convexos	Subangulosos-subredondeados
10-Az	29,96	2,72	17,98	4,23	45,11 (4,0;7,4; 7; 21,3)	0,32	9,73	1,2-1,4	Largos, cóncavo-convexos	Subangulosos-subredondeados

■ TABLA VI.2

Composición mineralógica (expresada en porcentaje) y parámetros petrográficos de las rocas carbonatadas (Q-cuarzo)

	Porosidad (%)	Matriz Micrítica (%)	Dolo-Micrita (%)	Tamaño micrita (µm)	Micro-Esparrita calcítica (%)	Dolo-Micro-esparrita (%)	Tamaño microesparrita (µm)	Tamaño esparrita cristalina (µm)	Cemento calcítico (%)	Cemento dolomítico (%)	Tamaño cemento (µm)	Bioclastos (%)	Peloides (%)	Ooides (%)	Q y min. Arcillas (%)	Tamaño clastos (µm)	Tamaño medio (µm)
8-Tu	22,02	64,77	<1	<1	3,08	8,79	40	29,91	2,25	300	100						
9-Fr	15,2	76,92	<1	<1	4,32	8,31	150	49,39	22,56	70	60						
12-Ca	0,82	21,63	<1	<1	10,17	10,07	60	30,52	10,17	480	270						
13-Pu	2,66	40,7	<1	<1	27,18	27,18	100	14,56	6,47	170	60						
28-Ort	3,12	50,59	<1	<1	52,81	52,81	230			130							
29-A	0,65	51,78	<1	<1	69,33	69,33	125	13,54		36							
16-VI-I	4,51				42,36	42,36	90	17,47		52							
17-CFI	3,26				48,85	48,85	70			40							
17-CFS	8,54				80,86	80,86	60			20							
18-VI-II	4,6	8,31	1														
27-Tr	4,09																
30-D	3,43				400	89,83	10,17	250		300							
31-B1	9,19				10,99	25	200			30							
31-B2	9,3				9,38	25	250			30							
31-B3	6,8				5,21	2	73,95	30	13,68	7,16	150						

estas rocas van a ser los responsables de su diferente comportamiento físico. En el apartado VI-5 se ha realizado una correlación entre los parámetros petrográficos, estructura porosa y propiedades físicas.

VI.2.2. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

En esta tesis doctoral se aporta un archivo analítico de las diferentes rocas aragonesas caracterizadas. La caracterización geoquímica, realizada sobre muestras inalteradas, aporta información sobre la composición química de los materiales que pueden redundar en su alterabilidad y durabilidad (Esbert *et al.*, 1997; Winkler, 1997).

Se ha realizado una determinación del residuo insoluble (R.I.) por gravimetría tras ataque ácido y del contenido de agua, materia orgánica (M.O.) y CO₂ mediante el cálculo de la pérdida en peso por ignición tras calentamientos escalonados a 200 °C, 500 °C y 900 °C respectivamente. Los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla VI-3.

Este estudio se ha completado con un análisis químico de elementos mayores de roca total mediante fluorescencia de Rayos X, en condiciones normalizadas. Los resultados del análisis geoquímico de elementos mayores se muestran en las tablas VI-4 y VI-5.

Discusión y resultados

■ TABLA A.I.1

Valores del residuo insoluble y del contenido de agua, materia orgánica y CO₂ para las rocas carbonatadas, expresados en porcentaje

	% H ₂ O	% M.O.	% CO ₂	% R.I.
8-Tu	0,61	1,11	41,60	1,01
9-Fr	0,26	1,29	42,02	1,53
12-Ca	0,26	0,70	40,90	5,10
13-Pu	0,14	0,53	42,99	2,28
28-Crt	0,50	0,98	39,64	6,86
29-A	0,13	0,27	43,37	0,61
16-VI-I	0,04	0,04	43,85	0,20
17-CFS	0,08	0,02	43,84	0,30
17-CFI	0,08	0,05	43,82	0,24
18-VI-II	0,11	0,32	43,51	0,82
27-Tr	0,17	0,89	42,56	0,83
30-D	0,13	0,70	44,58	0,47
31-BI1	0,19	0,96	45,03	1,20
31-BI2	0,33	1,29	44,77	2,01
31-BI3	0,11	0,89	46,04	0,41

TABLA VI.4

Resultado del análisis geoquímico de elementos mayores expresados en porcentaje en peso de óxidos, para las rocas detríticas

	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)	Suma
6-JUN	4,071	24,857	1,819	0,684	0,685	0,048	0,406	0,042	46,621	0,220	20,170	99,533
7-AY	5,168	22,174	2,311	0,908	0,837	0,051	0,505	0,051	48,752	0,325	18,380	99,360
10-AZ	1,126	30,330	0,639	0,473	1,566	0,013	0,067	0,026	41,012	0,106	24,800	100,119

TABLA VI.5

Resultado del análisis geoquímico de elementos mayores expresados en porcentaje en peso de óxidos, para las rocas carbonatadas

	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)	Suma
8-Tu	0,101	54,543	0,094	0,023	0,859	0,096	0,148	0,027	0,511	< LLD	43,290	99,692
9-Fr	0,075	53,775	0,083	0,018	1,083	0,047	0,125	0,009	1,121	< LLD	43,180	99,516
12-Ca	0,821	52,421	0,578	0,134	0,836	0,009	0,076	0,052	4,011	0,046	41,260	100,244
13-Pu	0,469	48,950	0,339	0,115	5,149	0,012	0,054	0,015	1,614	0,015	43,410	100,142
28-Ort	1,039	51,746	0,514	0,193	0,327	0,013	0,065	0,033	5,242	0,057	40,460	99,689
29-A	0,170	55,632	0,044	0,020	0,389	< LLD	0,047	< LLD	0,300	0,007	43,030	99,639
16-V-I	0,189	58,450	0,020	0,006	0,147	< LLD	0,065	< LLD	0,189	0,024	40,080	99,170
17-CFS	< LLD	57,790	0,026	< LLD	0,152	< LLD	0,049	< LLD	0,073	< LLD	41,080	99,170
17-CFI	0,033	58,770	0,011	< LLD	0,168	< LLD	0,067	< LLD	0,120	< LLD	39,940	99,109
18-V-II	0,280	54,840	0,099	0,020	0,668	< LLD	0,072	0,018	0,802	0,008	42,440	99,247
27-Tr	< LLD	56,220	0,014	< LLD	0,196	< LLD	0,058	< LLD	0,067	< LLD	42,970	99,525
30-D	0,225	44,070	0,069	0,024	9,490	< LLD	0,129	< LLD	0,397	< LLD	44,710	99,114
31-B1I	0,371	37,028	0,146	0,048	16,004	< LLD	< LLD	0,021	0,646	0,008	45,190	99,462
31-B12	0,727	32,710	0,293	0,101	18,877	< LLD	< LLD	0,016	1,255	0,028	45,560	99,567
31-B13	0,189	34,461	0,074	0,020	18,380	0,005	< LLD	0,011	0,588	< LLD	45,490	99,218

Los valores más altos de SiO_2 corresponden a las calizas de Calatorao (12-Ca) 4,01% y al Crema Teruel (28-Crt) 5,24%. El resto de las rocas presentan valores inferiores al 1%, salvo en el caso de la caliza Campanil de Fraga (9-Fr), la dolomía de Blancas (31-BI2) y la caliza de la Puebla de Albortón (13-Pu) que tienen unos valores comprendidos entre el 1 y el 2%.

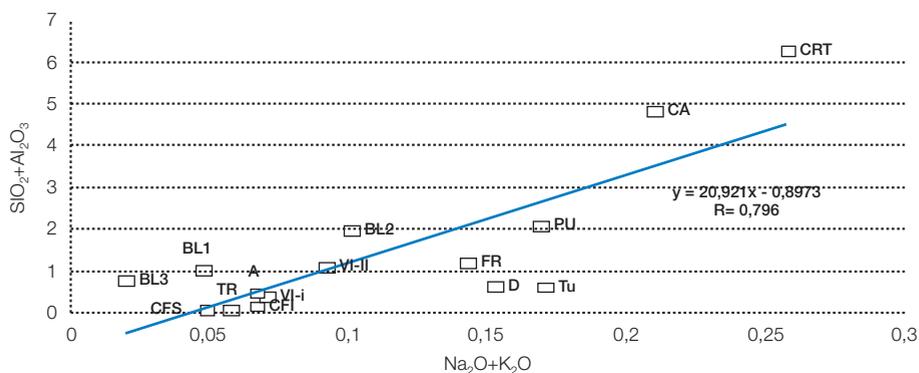
Las mayores cantidades de Na_2O y K_2O (figura VI-3) aparecen en las rocas que presentan un mayor porcentaje de sílice, en la caliza campanil de Tudela (8-Tu) y en la dolomía de Abanto (30-D). La relación entre la sílice con los álcalis podría indicar la presencia de un mayor porcentaje de partículas terrígenas.

Los porcentajes elevados de MgO en cinco de las rocas caracterizadas, junto con el estudio petrográfico, indica la presencia de dolomita entre su mineralogía. Estas rocas son: Crema Blancas (31-BI1), Blancas Jaspe (31-BI2), Blancas Moka (31-BI3), Puebla de Albortón (13-Pu) y dolomía de Abanto (30-D).

Los porcentajes mayores de Fe_2O_3 se corresponden con las rocas con mayores cantidades de sílice: Calatorao (12-Ca) y Crema Teruel (28-Crt).

■ FIGURA VI.3

Relación entre la suma de sílice y alúmina frente a sodio más potasio expresados en porcentaje en peso de óxidos



VI.3. Descripción del sistema poroso

VI.3.1. DISTRIBUCIÓN POROMÉTRICA MEDIANTE POROSIMETRÍA DE INYECCIÓN DE MERCURIO (PIM)

La importancia de cuantificar la distribución porométrica en los materiales pétreos de usos constructivos radica en la limitación que presenta el valor de porosidad total si nuestro objetivo es caracterizar el comportamiento del material. El comportamiento hídrico de los materiales pétreos depende tanto de su porosidad total como del tamaño, forma y grado de conexión de sus poros.

La porosimetría de inyección de mercurio permite determinar la distribución del volumen de poros en función del tamaño de acceso de poro, así como la porosidad total de la roca. Estos parámetros son fundamentales para interpretar el comportamiento del material frente al agua (Vos, 1978) y para evaluar su durabilidad frente a procesos tales como la heladicidad (Everett, 1961; Litvan, 1981) y la cristalización de sales (Goudie and Viles, 1997).

La porosimetría de inyección de mercurio se ha realizado sobre las 3 rocas detríticas y sobre 12 de las 15 rocas carbonatadas. Este ensayo no se ha podido realizar en las rocas 17-CFS, 18-VI-II y 27-Tr debido a que sus macroporos imposibilitan su realización. A partir de los resultados obtenidos con la porosimetría de inyección de mercurio se han calculado diferentes parámetros resumidos en la tabla VI-6. Además, se han construido para cada una de las rocas caracterizadas histogramas de frecuencia de distribución de radios de acceso de poro.

Discusión y resultados

■ TABLA A.I.6

Valores de macroporosidad, microporosidad, porosidad total, mediana, tamaño medio de radio de acceso y tamaños máximos de radio de acceso obtenidos por porosimetría de inyección de mercurio. El valor entre paréntesis indica el valor del radio medio de la microporosidad

	Macro-porosidad (%)	Micro-porosidad (%)	Porosidad Total PIM (%)	Mediana (μm)	Radio Medio (μm)	Máximos (μm)
8-Tu	0,12	12,59	12,71	0,20	(0,200) 1,66	0,2-0,15 1,25-1
9-Fr	0,36	16,10	16,47	0,53	(0,506) 0,660	0,4-0,3
12-Ca	0,03	1,69	1,72	0,0045	(0,0038)	0,005-0,001
13-Pu	0,28	2,13	2,41	0,015	(0,0123)	0,025-0,01
28-Crt	0,30	4,15	4,45	0,015	(0,015) 0,23	0,025-0,01 10-9
29-A	0,08	0,81	1,03	0,04	(0,0057) 0,18	0,025-0,01 7-6
16-VI-I	2,76	7,41	10,17	1,45	(1,300) 3,49	1,25-1 2-1,5
17-CFI	0,69	11,77	12,46	0,55	(0,507) 0,97	0,5-0,4
30-D	0,25	6,89	7,14	0,25	(0,27) 0,27	0,3-0,2
31-BI1	0,49	17,32	17,81	0,5	(0,599) 1,27	0,6-0,5 1-0,9
31-BI2	0,14	10,80	10,94	0,35	(1,205) 1,60	0,2-0,15 2-1,5
31-BI3	1,00	13,89	14,89	1,1	(2,830) 3,05	0,3-0,2 3-2,5
6-UN	1,38	8,08	9,46	0,7	3,99	0,3-0,2 3,5-3
7-AY	1,13	8,56	9,69	2	4,49	0,005-0,025 2,5-2 30-20
10-AZ	5,95	3,88	9,83	20	12,07	0,025-0,01 1,25-1

Las rocas que muestran un tamaño medio de acceso de poro inferior son las rocas clasificadas desde el punto de vista tecnológico como biomicritas-pelmicritas con porosidad inferior al 3% (12-Ca, 13-Pu, 28-Crt, 29-A). Este tamaño medio es especialmente reducido si se tiene en cuenta únicamente el tamaño medio de la microporosidad del material, que en todos los casos está comprendida entre el 88% y el 100% de la porosidad total. La roca 29-A presenta un valor medio de tamaño de acceso de poro de 0,18 mm como consecuencia de una macroporosidad del 8% debida a estilolitos y vénulas parcialmente rellenas. Esta es una porosidad secundaria no selectiva de la fábrica. A pesar de esta macroporosidad, el comportamiento hídrico de esta roca está controlado por el elevado porcentaje existente de microporos de tamaño medio 0,0057 μm .

Las biomicritas con porosidad superior al 10% (8-Tu, 9-Fr) tienen unos valores similares de porosidad media y de porcentaje de macroporosidad, aunque la distribución de tamaños de acceso de poro es sensiblemente diferente entre ambas rocas.

Las rocas recristalizadas, tanto calcíticas como dolomíticas (16-VI-I, 17-CFI, 30-D, 31-BI1, 31-BI2, 31-BI3), presentan unos valores de macroporosidad y de tamaño medio de acceso de poro variables en función del grado de recristalización y procesos diagenéticos que han sufrido.

Las arenitas miocenas presentan unos valores de porosidad total similares comprendidos entre el 9,46% de 6-Un y el 9,83% de 10-Az. Las arenitas 6-Un y 7-Ay exhiben unos porcentajes de macroporosidad y un tamaño medio de acceso de poro similar, mientras que la arenita de Alcañiz 10-Az se caracteriza por un mayor porcentaje de macroporosidad y un mayor tamaño medio de acceso de poro.

A partir de los resultados obtenidos mediante porosimetría de inyección de mercurio se ha realizado una doble clasificación de las rocas:

A) Clasificación en función del porcentaje en volumen de poros para las principales clases de tamaño de acceso de poro

En función del porcentaje de porosidad correspondiente a cada uno de los rangos de tamaño de acceso de poro establecidos, se han dividido las rocas en 3 grupos.

Grupo I. Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por presentar una porosidad con más del 86% de sus radios de acceso de poro inferiores a 0,1 μm . Las rocas que presentan esta distribución porométrica son las biomicritas con porosidad inferior al 3% (12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A).

	Tamaño medio μm	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1-10 μm	>10 μm	Máximos μm
12-Ca	(0,0038) 0,0038	80,38%	11,62%	5,58%	1,01%	1,38%	0,005-0,001
13-Pu	(0,0123) 0,0123	18,75%	69,72%	0,00%	2,88%	8,64%	0,025-0,01
29-A	(0,0057) 0,18	16,60%	69,89%	3,18%	10,31%	0,00%	0,025-0,01 10-9
28-Crt	(0,015) 0,230	15,86%	76,65%	0,68%	2,43%	4,36%	0,025-0,01

Grupo II. Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan (y se diferencian de las rocas pertenecientes a los grupos I y III) porque más del 65% de su volumen de accesos de poro pertenece al rango 0,1-1 μm . Las rocas que se encuadran en este grupo son las biomicritas con porosidad superior al 10% (8-Tu, 9-Fr) y las rocas carbonatadas recristalizadas (17-CFI, 30-D, 31-BI1 y 31-BI2).

	Tamaño medio μm	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1-10 μm	>10 μm	Máximos μm
30-D	(0,11) 0,276	1,37%	15,39%	79,71%	0,88%	2,65%	0,3-0,2
9-Fr	(0,506) 0,660	0,00%	0,00%	79,11%	18,60%	2,29%	0,4-0,3 1,25-1
17-CFI	(0,507) 0,970	0,14%	6,39%	64,35%	24,99%	4,12%	0,5-0,4 2-1,5
31-BI1	(0,599) 1,270	3,80%	6,95%	83,08%	4,17%	2,10%	0,6-0,5
31-BI2	(1,205) 1,600	0,00%	8,95%	75,28%	14,71%	1,05%	0,2-0,15 1-0,9
8-Tu	(0,200) 1,660	0,00%	0,00%	98,91%	0,33%	0,80%	0,2-0,15

Grupo III. Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por presentar más de un 45% de sus radios de acceso de poro mayores de 1 μm . Las rocas que se encuadran en este grupo son las rocas carbonatadas recristalizadas (16VI-I y 31-BI3) y las arenitas (6-Un, 7-Ay y 10-Az).

	Tamaño medio μm	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1-10 μm	>10 μm	Máximos μm
31-BI3	(2,830) 3,050	0,22%	7,16%	41,46%	46,49%	4,67%	0,3-0,2 2-1,5
16-VI-I	(1,300) 3,490	0,00%	4,77%	27,83%	47,61%	19,7%	1,25-1 7-6
6-UN	3,99	1,55%	17,77%	33,64%	39,39%	7,68%	0,3-0,2 3-2,5
7-AY	4,49	6,16%	14,68%	21,13%	47,08%	10,9%	0,005-0,02 3,5-3
10-AZ	12,07	0,84%	11,27%	9,74%	17,66%	60,4%	0,025-0,01 2,5-2 30-20

B) Clasificación según la distribución de tamaños de accesos de poro

Esta clasificación se ha realizado en función del número de máximos presentes en la distribución de tamaños de accesos de poro y según la posición relativa de los mismos. Para cada uno de los tres grupos diferenciados se ha incluido, a modo de ejemplo, una gráfica de distribución porométrica, mientras que las gráficas de todas las rocas caracterizadas se exponen en el anexo 1.

Grupo A: Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por una distribución unimodal de los tamaños de acceso de poro (figura VI-4). Esta distribución porométrica la tienen las biomicritas con porosidad inferior al 3% (12-Ca, 13-Pu y 28-Crt), la biomicrita con porosidad superior al 10% (8-Tu) y las rocas carbonatadas recrystalizadas (30-D y 31-BI1). Estas rocas presentan la práctica totalidad de sus accesos de poro en un pequeño rango de tamaños, diferenciándose dos grupos en función del rango que muestra un mayor porcentaje de tamaños de acceso de poro.

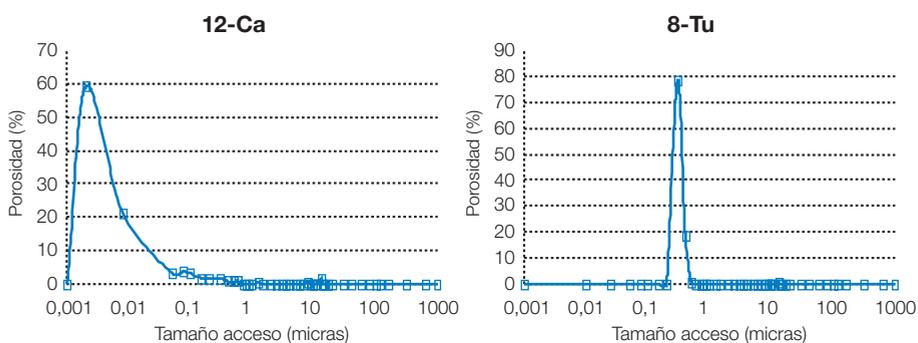
Grupo A.1. Rocas con más de un 90% de sus accesos de poro con un tamaño inferior a 0,1 μm : 12-Ca, 13 Pu y 28-Crt.

Grupo A.2. Rocas con más de un 80% de sus accesos de poro comprendidos entre 0,1-1 μm : 8-Tu, 30-D y 31-BI1.

	Tamaño medio μm	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1-10 μm	>10 μm	Máximos μm
12-Ca	0,0038	80,38%	11,62%	5,58%	1,01%	1,38%	0,005-0,001
13-Pu	0,0123	18,74%	69,71%	0,00%	2,88%	8,64%	0,025-0,01
28-Crt	0,23	15,86%	76,65%	0,68%	2,43%	4,36%	0,025-0,01
30-D	0,276	1,37%	15,38%	79,71%	0,88%	2,65%	0,3-0,2
31-BI1	1,27	3,80%	6,95%	83,08%	4,17%	2,10%	0,6-0,5
8-Tu	1,66	0,00%	0,00%	98,90%	0,33%	0,80%	0,3-0,2

■ FIGURA VI.4

Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo A.1 (12-Ca) y del grupo A.2 (8-Tu)



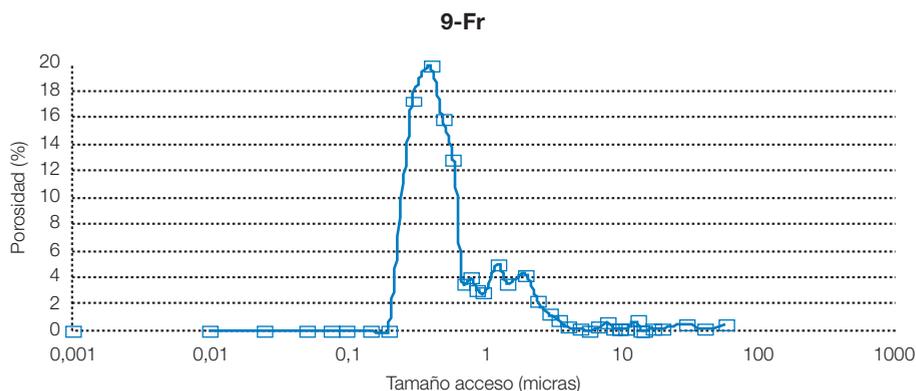
Grupo B: Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por una distribución bimodal y asimétrica negativa de sus accesos de poro (figura VI-5). Esta distribución porométrica la pre-

sentan la biomicrita con porosidad inferior al 3% (29-A), la biomicrita con porosidad superior al 10% (9-Fr), las rocas carbonatadas recristalizadas (16-VI-I y 17CFI) y la arenita (6-Un).

	Tamaño medio μm	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1-10 μm	>10 μm	Máximos μm	
29-A	0,18	16,61%	69,89%	3,18%	10,31%	0,00%	0,025-0,01	10-9
9-Fr	0,660	0,00%	0,00%	79,11%	18,60%	2,29%	0,4-0,3	1,25-1
17-CFI	0,970	0,14%	6,39%	64,35%	24,99%	4,12%	0,5-0,4	2-1,5
16-VI-I	3,490	0,00%	4,77%	27,83%	47,61%	19,77%	1,25-1	7-6
6-UN	3,990	1,55%	17,77%	33,60%	39,39%	7,68%	0,3-0,2	3-2,5

■ FIGURA VI.5

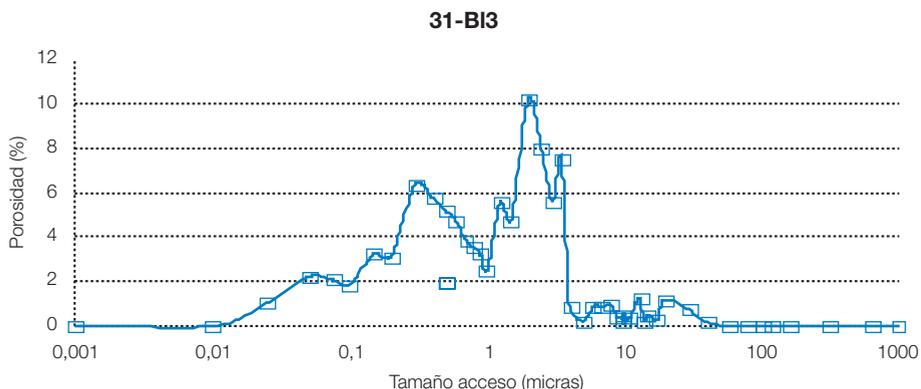
Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo B (9-Fr)



Grupo C: Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por una distribución bimodal de sus accesos de poro (polimodal en el caso de la arenita 10-Az) y asimétrica positiva (figura VI-6). Esta distribución porométrica la presentan las rocas carbonatadas recristalizadas (31-BI2 y 31-BI3) y las arenitas (7-Ay y 10-Az).

	Tamaño medio μm	0,001-0,01 μm	0,01-0,1 μm	0,1-1 μm	1-10 μm	>10 μm	Máximos μm	
31-BI2	1,600	0,00%	8,95%	75,27%	14,72%	1,06%	0,2-0,15	1-0,9
31-BI3	3,050	0,22%	7,16%	41,46%	46,49%	4,68%	0,3-0,2	2-1,5
7-Ay	4,490	6,16%	14,68%	21,13%	47,08%	10,97%	0,005-0,025	3,5-3
10-Az	12,070	0,84%	11,27%	9,74%	17,66%	60,47%	0,025-0,01	2,5-2 30-20

■ FIGURA VI.6

Ejemplo de distribución pométrica de las rocas del grupo C (31-BI3)**VI.3.2. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES (ADI)**

La ventaja de utilizar técnicas microscópicas para el estudio del sistema poroso es la obtención de datos directos, tanto del tamaño como de la geometría de los poros. Por el contrario, esta técnica cuenta con la desventaja del gran número de mediciones necesarias para tener datos representativos, así como la limitación en la resolución de la imagen de partida que obtenemos a partir del microscopio óptico. Por ello, su combinación con la microscopía electrónica de barrido es útil para el estudio de materiales pétreos con una elevada microporosidad (Buj *et al.*, 2006).

Las rocas caracterizadas mediante análisis digital de imágenes han sido las arenitas terciarias del Valle del Ebro. La elección de estos materiales ha sido consecuencia de su elevado deterioro tras los procesos de cristalización de sales, motivo por el cual hemos pretendido profundizar en el conocimiento de su sistema poroso.

Discusión y resultados

La caracterización de la porosidad mediante análisis digital de imágenes aplicado al microscopio óptico nos ha permitido obtener los siguientes parámetros para estas arenitas (tabla VI-7).

■ TABLA VI.7

Parámetros obtenidos mediante análisis digital de imágenes

	Macro-porosidad (%)	Micro-porosidad (%)	Porosidad total (ADI) (%)	Radio medio (µm)	Máximos (µm)
6-Un	4,85	4,67	9,52	8,30	10-15
7-Ay	6,92	5,04	11,96	8,94	5-10
10-Az	4,08	5,12	9,2	7,14	5-10

El radio medio de los poros de las arenitas de 6-Un y 7-Ay es similar, con unos valores de 8,30 µm y 8,94 µm respectivamente, mientras que la arenita de Alcañiz presenta un tamaño de

poro medio de 7,14 μm . Las tres rocas alcanzan unos valores similares para sus máximos, siendo de 10-15 μm en 6-Un y de 5-10 μm en 7-Ay y 10-Az.

El índice de esfericidad de Wadell (cuanto más próximo a 1 más esférico será el poro) indica que los poros de estas arenitas presentan una esfericidad media. La representación gráfica de estos resultados indica un alargamiento del sistema poroso en la dirección perpendicular a la estratificación, mientras que en la dirección paralela presenta una distribución normal.

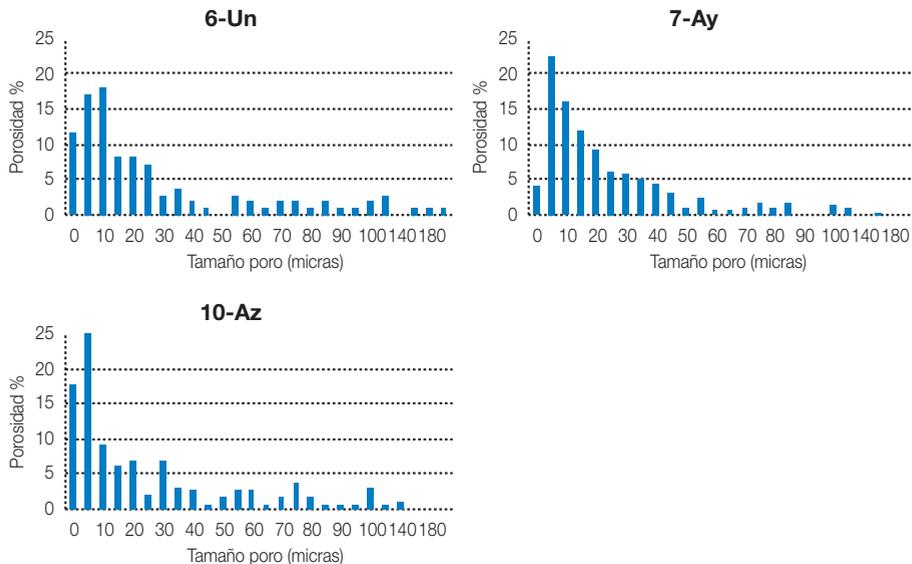
En la figura VI-7a se han representado los histogramas de distribución de tamaños de poro para estas arenitas. La roca 6-Un presenta una distribución continua en sus tamaños de poro, disminuyendo gradualmente el volumen de poros desde tamaños de poro de 10-15 μm hasta tamaños de poro de 50-55 μm .

La roca 7-Ay tiene una distribución más continua en sus tamaños de poro que 6-Un, disminuyendo gradualmente el porcentaje de poros desde tamaños de poro de 5-10 μm hasta tamaños de poro de 60-65 μm .

La roca 10-Az presenta en su distribución un mayor porcentaje de poros de pequeño tamaño con el 55,66% de los poros menores a 15 μm y con el 45% de sus poros menores a 10 μm . El estudio con el microscopio electrónico de barrido de los líticos carbonatados de esta arenita indica que el 8,10% de su superficie corresponde a microporosidad.

■ FIGURA VI.7A

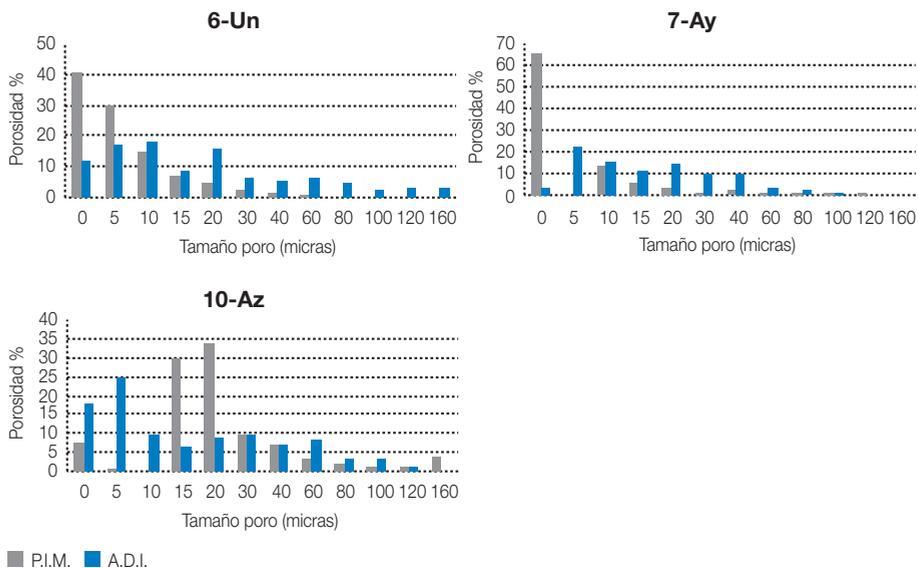
Distribución porométrica de las arenitas estudiadas. En abscisas se representa el diámetro de poro en micras y en ordenadas la porosidad en porcentaje



En estas rocas se contrastó los valores obtenidos mediante análisis digital de imágenes y porosimetría de inyección de mercurio (figura VI-7b). (Sólo se han contabilizado los poros mayores de 3 micras, dado que es el límite de resolución de la imagen de partida con el análisis digital de imágenes).

■ FIGURA VI.7B

Distribución pomométrica de las arenitas estudiadas. En abscisas se representa el tamaño de poro en micras y en ordenadas la porosidad en porcentaje



La porosimetría de inyección de mercurio aporta información precisa sobre el tamaño de acceso de poro pero, como se observa en la figura 7b, el sistema poroso de las rocas posee unos radios de acceso inferiores al tamaño de poro determinado y, por tanto, sobrevalora los tamaños de poro inferiores. Por su parte, el análisis digital de imágenes permite, a diferencia de la porosimetría de inyección de mercurio, calcular con mayor precisión los poros mayores de 3 micras y obtener información directa sobre las morfologías de los mismos. Sin embargo, esta técnica calcula la porosidad total sin discriminar entre la porosidad abierta y la porosidad cerrada.

Otro problema que presenta la porosimetría de inyección de mercurio es la aplicación de grandes presiones que pueden ocasionar fracturas en los componentes minerales de la roca. Este es el efecto que probablemente tiene lugar en la roca 10-Az (figura 7b), en la cual según la porosimetría de inyección de mercurio no estarían representados los tamaños de poro comprendidos entre 5 y 15 μm , aunque ha quedado patente la existencia de poros en estos rangos mediante análisis digital de imágenes.

VI.4. Análisis del comportamiento físico

VI.4.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DEL MATERIAL

Los ensayos hídricos tienen como objetivo la caracterización del sistema poroso de los materiales pétreos. Los espacios vacíos (poros y fisuras) son los lugares donde tienen lugar los procesos físico-químicos y biológicos (Guerrero Montes, 1990), por ello es de gran interés el estudio del sistema poroso de las rocas para poder valorar el comportamiento del material frente a una posible alteración. Estos poros difieren en cuanto a tamaño, morfología y conexión sien-

do estos parámetros los que controlan el movimiento de los fluidos en su interior. La importancia del agua como agente de alteración es doble; directa: participa en la mayoría de los procesos de deterioro químicos, físico-químicos y biológicos, e indirecta: es el vehículo de transporte de materia orgánica, sales solubles y contaminantes atmosféricos.

La caracterización de todas aquellas propiedades relacionadas con la ganancia, pérdida y circulación de fluidos en los materiales pétreos es de gran importancia para poder inferir la durabilidad del material en función de su sistema poroso.

El comportamiento hídrico de estas rocas se ha caracterizado mediante la evaluación de diferentes propiedades hídricas, relacionadas con las características del sistema poroso del material (tabla VI-8). En todos los casos posibles, los ensayos se han realizado sobre las mismas probetas siguiendo un proceso continuo en el tiempo, con el objetivo de obtener unos resultados lo más representativos posibles y evitando posibles variaciones por la heterogeneidad del material.

■ TABLA VI.8

Ensayos hídricos realizados y parámetros calculados

Ensayo	Parámetro calculado
Absorción libre de agua, por inmersión total	W, ρ_b , ρ_{ph} , y P_o .
Densidad real. Método del picnómetro	ρ_r , P y P_{in} .
Ensayo automatizado de absorción y desorción libre de agua a presión atmosférica	S_{11} , S_{24} , S_{48} , T_{W25} , T_{W50} , T_{W75} , T_{W100} , W_{crit} , W_d y curvas de absorción y desorción continua.
Absorción de agua por capilaridad: Succión capilar	A.C. y C.A.C.

VI.4.1.1. Absorción, densidad aparente y porosidad abierta. UNE-EN 13755:2002

Todo material pétreo, al ser sumergido en agua en condiciones ambientales de presión y temperatura, absorbe de una forma más o menos rápida cierta cantidad de agua dependiendo de la configuración de su sistema poroso. La mayoría de los materiales pétreos con tiempos suficientemente largos alcanzarían valores de absorción de equilibrio. En este ensayo se ha controlado la evolución del contenido en humedad de la probeta en el tiempo.

Los parámetros calculados para el ensayo de absorción han sido:

Contenido en humedad (W)

Se define como la cantidad de agua absorbida por la probeta mediante inmersión total en agua desionizada a presión atmosférica. El resultado se expresa como porcentaje de la masa seca de dicha probeta.

$$W = [(m_s - m_d) / m_d] \times 100$$

donde m_s es la masa de la probeta saturada (gr) y m_d es la masa de la probeta seca (gr).

Densidad aparente (ρ_b)

Se define como la relación entre la masa de la probeta seca y su volumen aparente (volumen limitado por la superficie externa de la probeta, incluyendo cualquier hueco).

$$\rho_b = [m_d / (m_s - m_h)] \times \rho_m$$

donde m_s es la masa de la probeta saturada (gr), m_d es la masa de la probeta seca (gr), m_h es la masa de la probeta en pesada hidrostática (gr) y ρ_m es la densidad del agua (Kg/m^3).

Densidad real (ρ_{rph}) calculada por el método de la pesada hidrostática

Se define como la relación entre la masa y el volumen impermeable de la muestra (diferencia entre el volumen aparente de la probeta y el volumen de huecos, poros abiertos y cerrados):

$$\rho_{\text{rph}} = [m_d / (m_d - m_h)] \times \rho_{\text{rh}}$$

donde m_d es la masa de la probeta seca (gr), m_h es la masa de la probeta en pesada hidrostática (gr) y ρ_{rh} es la densidad del agua (Kg/m^3).

Porosidad abierta, accesible al agua (P_0)

Se define como la relación en porcentaje entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente de la probeta:

$$P_0 = [(m_s - m_d) / (m_s - m_h)] \times 100$$

donde m_s es la masa de la probeta saturada (gr), m_d es la masa de la probeta seca (gr) y m_h es la masa de la probeta en pesada hidrostática (gr).

Discusión y resultados

La densidad de la roca, la porosidad abierta y el contenido de agua en saturación son parámetros dependientes entre sí. Estas rocas se han clasificado en tres grupos en función de su porosidad abierta (tabla VI-9):

Rocas con porosidad alta (aquellas que presentan una porosidad superior al 15%): 8-Tu y 9-Fr.

Rocas con porosidad media (aquellas que presentan una porosidad comprendida entre el 5 y el 15%): 6-Un, 7-Ay, 10-Az, 17-CFI, 31-BI1, 31-BI2 y 31-BI3.

Rocas con porosidad baja (aquellas que presentan una porosidad inferior al 5%): 12-Ca, 13-Pu, 16-VI-I, 17-CFS, 18-VI-II, 27-Tr, 28-Crt, 29-A y 30-D.

■ TABLA VI.9

Resultados de los ensayos de absorción: contenido en humedad W (%), densidad aparente ρ_b (Kg/m^3), densidad real método de la pesada hidrostática ρ_{rph} (Kg/m^3) y porosidad abierta P_0 (%). Rocas ordenadas en función de su W

	Contenido en humedad			ρ_b (Kg/m^3)	ρ_{rph} (Kg/m^3)	P_0 (%)
	W (%)	Desv. típica	Coef. Variación			
8-Tu	11,23	0,405	0,036	1959,97	2515,05	22,02
9-Fr	6,99	0,246	0,035	2167,97	2558,32	15,2
31-BI2	3,83	1,513	0,395	2454,49	2720,67	9,3
31-BI1	3,78	0,407	0,105	2436,93	2683,44	9,19
17-CFI	3,62	0,485	0,135	2365,15	2586,01	8,54
31-BI3	2,76	0,859	0,311	2473,86	2656,58	6,8
18-VI-II	1,95	0,371	0,19	2366,12	2469,57	4,6
16-VI-I	1,87	0,278	0,148	2417,09	2537,04	4,51
27-Tr	1,66	0,122	0,073	2462,49	2563	4,09
30-D	1,32	0,172	0,13	2590,35	2682,29	3,43
17-CFS	1,3	0,272	0,213	2515,82	2600,45	3,26
28-Crt	1,21	0,083	0,069	2581,54	2663,46	3,12
13-Pu	1,01	0,138	0,136	2636,77	2695,42	2,66
12-Ca	0,31	0,063	0,207	2660,07	2684,34	0,82
29-A	0,24	0,04	0,165	2687,05	2704,59	0,65
7-AY	5,73	0,188	0,033	2208,77	2524,87	12,63
6-UN	4,61	0,608	0,132	2272,96	2531,83	10,43
10-AZ	4,29	0,065	0,017	2273,68	2521,56	9,73

VI.4.1.2. Densidad real. Método del picnómetro. UNE-EN 1936:2007

Los parámetros calculados mediante este ensayo han sido:

Densidad real (ρ_r)

La densidad real se define como el cociente entre la masa y el volumen del sólido y ha sido obtenida a partir de la ecuación:

$$\rho_r = [m_e / (m_2 + m_e - m_1)] \times \rho_{th}$$

donde m_e es la masa de la probeta seca y triturada (gr), m_1 es la masa del picnómetro lleno con agua y con la probeta triturada (gr), m_2 es la masa del picnómetro lleno con agua (gr) y ρ_{th} es la densidad del agua (Kg/m^3).

Porosidad total (P)

Se define como la relación en porcentaje entre el volumen de los poros (abiertos y cerrados) y el volumen aparente de la probeta.

$$P = [1 - (\rho_b / \rho_r)] \times 100$$

donde ρ_b es la densidad aparente de la probeta (Kg/m^3) y ρ_r es la densidad real de la probeta (Kg/m^3).

Porosidad inaccesible (P_{in})

Se define como la diferencia entre la porosidad total y la porosidad abierta. Se ha expresado como porcentaje respecto de la porosidad total.

$$P^{in} = P - P_o$$

donde P es la porosidad total de la probeta (%) y P_o es la porosidad abierta de la probeta (%).

Discusión y resultados

Los valores más altos de la densidad real dentro de las rocas carbonatadas corresponden a las rocas que presentan contenidos más altos de dolomita 13-Pu, 30-D y 31-BI1, 31-BI2 y 31-BI3 (dada la mayor densidad de este mineral respecto a la calcita). La caliza 29-A presenta una elevada densidad real debido a que se trata de una caliza muy pura, presentando un valor de densidad próximo al valor teórico de la calcita que es de $2,71 \text{ gr}/\text{cm}^3$ (tabla VI-10).

Los valores más altos de porosidad inaccesible respecto de la porosidad total de la roca en el grupo de las rocas carbonatadas corresponden a las rocas recristalizadas, siendo estos valores especialmente elevados en el caso de las rocas recristalizadas de composición calcítica.

Las rocas carbonatadas no recristalizadas presentan valores de porosidad inaccesible inferiores al 10% de la porosidad total.

Las tres arenitas miocenas exhiben valores similares de porosidad inaccesible respecto de la porosidad total, estando comprendidos entre el 23% de 6-Un y el 27% de 10-Az.

TABLA VI.10

Resultados de los ensayos de porosidad abierta P_0 (%), densidad real método del picnómetro ρ_r (Kg/m^3), porosidad total P (%), porosidad inaccesible P_{in} (%) y porosidad inaccesible respecto de la porosidad total P_{int} (%). Rocas ordenadas en función del valor de P_0

	P_0 (%)	P (%)	P_{in} (%)	P_{int} (%)	ρ_r (Kg/m^3)
8-Tu	22,02	23,28	1,26	5,4	2554,68
9-Fr	15,2	17,08	1,78	10,44	2617,07
31-BI2	9,3	10,64	1,34	12,62	2741,83
31-BI1	9,19	11,33	2,14	18,89	2751,79
17-CFI	8,54	10,3	1,76	17,08	2642,12
31-BI3	6,8	10,73	3,93	36,65	2767,01
18-VI-II	4,6	10,59	5,99	56,56	2650,7
16-VI-I	4,51	9,63	5,12	53,19	2666,93
27-Tr	4,09	7,35	3,26	44,39	2655,29
30-D	3,43	3,74	0,31	8,35	2690,69
17-CFS	3,26	4,91	1,65	33,57	2650,05
28-Crt	3,12	3,4	0,32	9,41	2670,8
13-Pu	2,66	2,95	0,29	9,76	2709,88
12-Ca	0,82	0,83	0,01	0,77	2686,16
29-A	0,65	0,66	0,01	2,22	2708
7-AY	12,63	16,67	4,04	24,22	2645,6
6-UN	10,43	13,69	3,26	23,8	2634,76
10-AZ	9,73	13,36	3,63	27,16	2624,78

VI.4.1.3. Datos del sistema automatizado

La automatización del ensayo de absorción y desorción ha permitido obtener un registro continuo de la totalidad del ensayo, a partir del cual se han obtenido diferentes coeficientes que se describirán a continuación, así como gráficas de gran precisión que permiten analizar la dinámica del agua en el interior del sistema poroso de los materiales pétreos a presión atmosférica. Los ensayos de absorción y desorción se han realizado sobre las mismas probetas eliminando así los posibles errores debidos a la heterogeneidad del material.

Los ensayos de absorción y desorción continua, a diferencia de los ensayos hídricos realizados en los apartados anteriores, se han realizado con probetas cúbicas de 5 cm arista talladas a partir de los bloques de los que se obtuvieron las probetas de 7 cm de arista.

El proceso de secado de los materiales de construcción es de vital importancia, ya que la eficacia en el mismo, así como el tiempo de residencia de la humedad en el interior del material pétreo, está íntimamente relacionado con su durabilidad. El secado es un proceso complejo en el que intervienen múltiples factores: condiciones ambientales, sistema poroso del material pétreo, contaminación del sistema por sales disueltas, etc.

Los gráficos y parámetros calculados para los ensayos de absorción y desorción automatizados son:

Gráficas de absorción continua

Las gráficas de absorción continua muestran la variación en el tiempo del contenido en agua del material, expresado como porcentaje respecto a la masa seca de la probeta a temperatura constante y en condiciones definidas de humedad relativa.

Se han elaborado curvas experimentales a partir de los resultados obtenidos para el ensayo de absorción automatizado en un sistema de coordenadas X/Y para observar la evolución del contenido en humedad a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta la teoría sobre el comportamiento del flujo de agua a partir de una superficie saturada (Kalimeris y Hall, 1983). En abscisas se ha representado el tiempo expresado como raíz cuadrada del tiempo en segundos y en ordenadas se ha representado la absorción de agua.

Grado de saturación (S_1 , S_{24} y S_{48})

El grado de saturación se define como la cantidad de agua de una roca en un momento dado respecto al contenido máximo de agua que puede presentar. En la presente tesis doctoral me voy a referir al grado de saturación como el contenido de agua de una roca en un momento dado respecto al contenido máximo que puede presentar en saturación en condiciones ambientales. Se han calculado los coeficientes de saturación para 1 (S_1), 24 (S_{24}) y 48 (S_{48}) horas. Estos coeficientes informan sobre la conectividad del sistema poroso e indican el porcentaje de poros que están rellenos de agua respecto al total de poros que pueden contenerla. Su valor oscila entre 0 y 100.

$$S_t = [(m_t - m_d) / (m_s - m_d)] \times 100$$

donde m_t es la masa de la probeta sumergida en agua durante un tiempo t (gr), m_s es la masa de la probeta saturada (gr) y m_d es la masa de la probeta seca (gr).

S_1 - Contenido de agua en una hora. Parámetro definido en la norma ISRM (1979).

S_{24} - Contenido de agua en 24 horas. Parámetro definido en la norma ISRM (1979).

S_{48} - Se define como el coeficiente de Hirschwald. Contenido de agua a los dos días. Definido en la norma ASTM 1978.

Tiempo de saturación (T_{W25} , T_{W50} y T_{W75})

Estos coeficientes se definen como el tiempo, desde el inicio del ensayo, que tarda el material en alcanzar una saturación del 25, 50 y 75% respectivamente. Estos coeficientes informan de la velocidad con la que tiene lugar el fenómeno de la absorción. Se han expresado como raíz cuadrada del tiempo en segundos.

Gráficas de desorción continua

Las gráficas de desorción continua muestran la variación en el tiempo del contenido en agua en la probeta a temperatura constante y en condiciones definidas de humedad relativa.

Se han elaborado curvas experimentales a partir de los resultados obtenidos para el ensayo de desorción automatizado en un sistema de coordenadas X/Y para observar la evolución de la desorción a lo largo del tiempo. En abscisas se ha representado el tiempo expresado en horas y en ordenadas se ha representado el contenido en humedad.

Contenido de agua en desorción (W_d)

Se define como la cantidad de agua retenida en la probeta tras el secado a presión atmosférica y temperatura ambiente. El resultado se expresa como porcentaje de la masa seca de dicha probeta.

$$W_d = [(m_{de}) - m_d] / m_d \times 100$$

donde m_{de} es la masa de la probeta seca en condiciones ambientales (gr) y m_d es la masa de la probeta seca (gr).

Contenido en agua crítico (W_{cr})

El contenido en agua crítico nos da información sobre la rapidez con la que el material evapora el agua absorbida. Se define como el contenido de agua en el que cambia la pendiente en la curva de desorción de tendencia lineal a asintótica a la base. A partir de este punto, el contenido de agua cae por debajo de la humedad crítica y el secado del material está controlado por la conductividad de vapor de agua.

Discusión y resultados

Graficas de absorción continua

El ensayo de absorción automatizado muestra el comportamiento frente a la absorción de cada uno de los 18 tipos rocosos. En estas gráficas se observan tanto diferencias en la cantidad total de agua absorbida, como en la cinética del proceso de absorción.

Las curvas de absorción muestran la existencia de rectas con distintas pendientes, que se corresponden con la existencia de familias de poros de diferente tamaño. La parte de la curva de mayor pendiente es debida a los poros de mayor diámetro y se corresponde con una absorción más rápida.

En función del material estudiado, las gráficas del ensayo de absorción se pueden descomponer en dos o tres fases con rectas de diferente pendiente, que reflejan el distinto comportamiento del material a lo largo del ensayo.

Fase inicial: La fase inicial del ensayo se caracteriza por una absorción rápida en la que se rellena la red capilar principal. En esta fase, la curva de absorción presenta un tramo recto con una acusada pendiente.

Fase intermedia: La fase intermedia se caracteriza por una pendiente y una velocidad de absorción con valores intermedios entre los de la fase inicial y final. En esta fase, el agua avanza hasta rellenar los capilares más finos. Presenta una duración variable en el tiempo en función de las características del sistema poroso del material y puede, o no, estar presente.

Fase final: La fase final del ensayo se caracteriza por una absorción muy lenta y progresiva, en la que el agua avanza a través de los capilares más inaccesibles. El tramo final de la curva se caracteriza por una pendiente baja con una tendencia prácticamente lineal.

Las rocas caracterizadas en la presente tesis doctoral se han dividido en tres grupos en función de los tramos con diferente pendiente que muestran las curvas de absorción. Para cada uno de los tres grupos diferenciados se ha incluido a modo de ejemplo una gráfica de absorción, mientras que las gráficas de todas las rocas caracterizadas se exponen en el anexo 1.

Rocas grupo A:

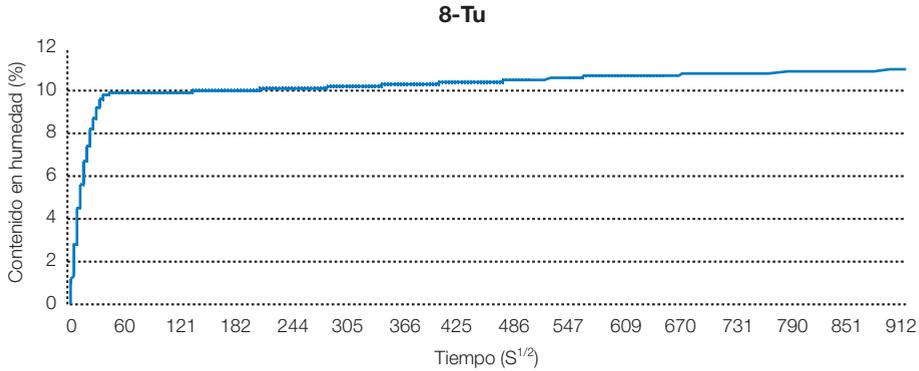
Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-8) no poseen la fase intermedia y presentan un cambio neto de pendientes entre la fase inicial y la final. Las rocas incluidas en este grupo son:

Biomicitas porosidad superior al 10%: 8-Tu y 9-Fr.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 16-VI-I, 17-CFS y 31-BI1-2-3.

Los resultados obtenidos para las rocas que componen este grupo indican un sistema poroso bien comunicado, que permite un movimiento rápido del agua en su interior a través de accesos de gran tamaño.

■ FIGURA VI.8

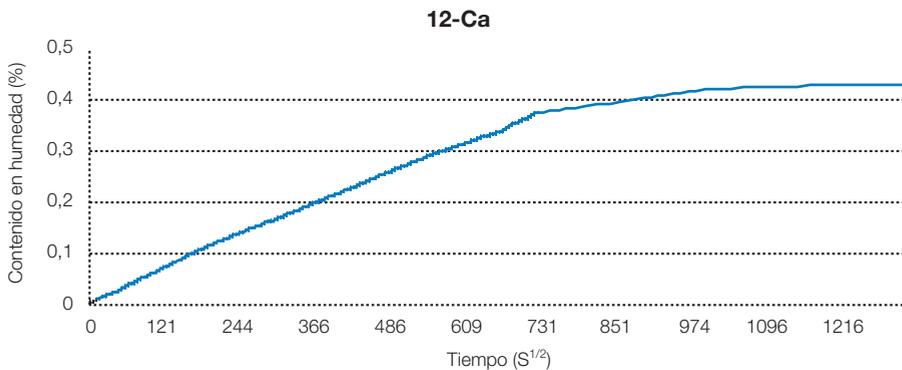
Curva de absorción libre de agua en la roca 8-Tu. (Grupo A).**Rocas grupo B:**

Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-9) no presentan la fase intermedia pero, a diferencia de las rocas del grupo A, poseen un cambio de pendiente gradual entre la fase inicial y la fase final. Las rocas incluidas en este grupo son:

Biomicitras-pelmicitras porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 27-Tr y 30-D.

■ FIGURA VI.9

Curva de absorción libre de agua en la roca 12-Ca (Grupo B)

Las rocas pertenecientes a este grupo muestran una absorción inicial lenta que tarda en estabilizarse e indica un movimiento lento del agua en su interior a través de un sistema poroso tortuoso y compuesto por accesos de poros de pequeño tamaño y mal comunicados. Dentro de este grupo las rocas 12-Ca y 29-A presentan la velocidad de absorción más lenta.

Rocas grupo C:

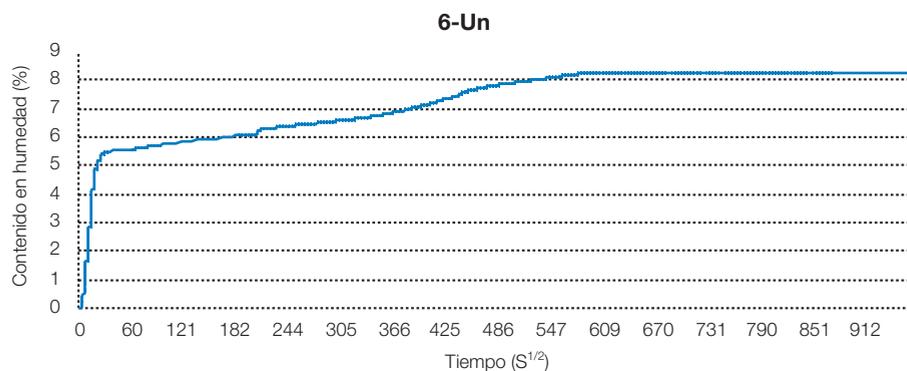
Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-10) presentan la fase intermedia y el cambio de pendiente entre la fase inicial y la intermedia es neto. Las rocas incluidas en este grupo son:

Rocas recristalizadas carbonatadas: 17-CFI y 18-VI-II.

Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

■ FIGURA VI.10

Curva de absorción libre de agua en la roca 6-Un (Grupo C)



Los resultados obtenidos para las rocas que componen este grupo indican una alta porosidad, con macroporos bien comunicados por conductos de gran radio que le confieren al material una elevada capacidad de absorción de agua. La presencia de la fase intermedia indica la existencia de un amplio rango de tamaños de acceso de poro.

Los parámetros calculados a partir de las gráficas de absorción continua se muestran en la tabla VI-11.

El mayor grado de saturación a 1 hora es para la caliza campanil de Tudela (8-Tu) que alcanza una saturación del 90% (figura VI-11). El resto de las rocas que presentan saturaciones iniciales importantes son rocas englobadas dentro de los grupos A y C según la división realizada mediante el ensayo de absorción automatizado. Una saturación rápida indica una buena conectividad del sistema poroso de la roca, independientemente de que la porosidad total de la misma sea alta o baja.

Las rocas que han sido clasificadas dentro del grupo B, a partir del ensayo de absorción automatizado, son las que presentan unos coeficientes de saturación inferiores, indicando una baja conectividad de su sistema poroso.

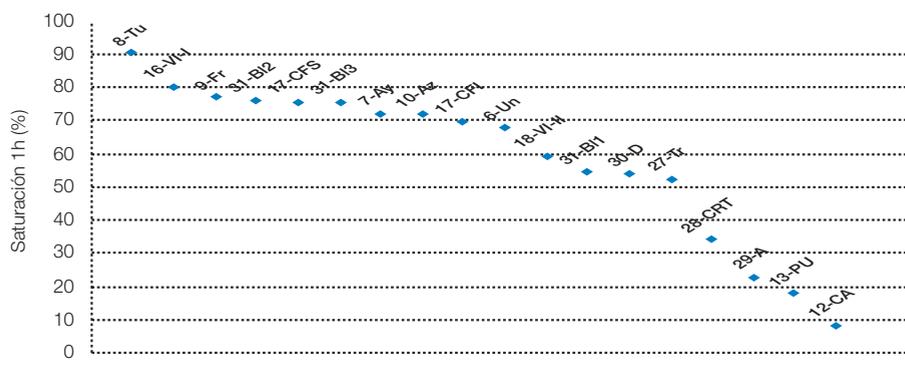
■ TABLA VI.11

Resultados del grado de saturación a 1 hora S_1 (%), grado de saturación a 24 horas S_{24} (%), grado de saturación a 48 horas S_{48} (%), tiempo de saturación al 25% T_{W25} ($s^{1/2}$), tiempo de saturación al 50% T_{W50} ($s^{1/2}$) y tiempo de saturación al 75% T_{W75} ($s^{1/2}$). Rocas ordenadas en función del valor de S_1

	S_1	S_{24}	S_{48}	T_{W25}	T_{W50}	T_{W75}
8-Tu	90,32	92,67	94,54	7	14	25
16-VI-I	80,2	85,07	88,54	10	21	42
9-Fr	77,13	83,39	86,43	12	26	54
31-BI2	76,08	84,05	86,6	12	27	57
17-CFS	75,74	90,28	92,6	16	32	58
31-BI3	75,52	84,56	87,84	12	23	52
17-CFI	69,8	79,64	84,67	7	16	176
18-VI-II	59,4	71,24	72,39	9	33	614
31-BI1	54,41	82,09	85,44	23	53	117
30-D	53,93	85,14	91,77	17	52	164
27-Tr	52,46	86,52	91,86	22	55	140
28-Crt	34,04	84,05	97,01	64	132	236
29-A	23,44	64,93	78,42	65	189	383
13-Pu	17,13	62,45	75,51	91	212	410
12-Ca	8	35,82	49,13	191	422	666
7-AY	72,24	82,13	86,02	11	26	112
10-AZ	71,8	79,82	84	3	6	142
6-UN	67,78	79,68	88,27	10	16	204

■ FIGURA VI.11

Rocas ordenadas en función del grado de saturación en 1 hora (S_1)



Gráficas de desorción continua

Las gráficas de desorción muestran la evolución en el tiempo del contenido en humedad para estos materiales. Las curvas de evaporación pueden descomponerse en dos fases:

Fase inicial o fase capilar: Etapa de secado más rápido con tasa de secado constante que depende fundamentalmente de las características del sistema poroso y de las condiciones ambientales (temperatura, presión y humedad). En esta etapa, la evaporación tiene lugar en la película de agua más externa. El aporte hídrico desde el interior del material hacia la superficie tiene lugar por el mecanismo de capilaridad.

Fase final o fase difusión: Etapa de secado más lento con tasa de secado descendente. Cuando el aporte de agua desde el interior disminuye, se produce una disminución rápida en la velocidad de secado. A este punto, en el que se produce un cambio en el comportamiento del material, se le denomina punto crítico (Vos, 1976). A partir de este punto, el secado ya no tiene lugar desde la superficie de la probeta, sino desde el interior de la misma donde continúa con el agua ligada por fuerzas capilares o electrostáticas. Ahora la velocidad de secado está determinada por el coeficiente de difusión de vapor de agua en la roca, siendo el proceso cada vez más lento y tendiendo a estabilizarse el contenido en agua de forma asintótica (Alonso, 1986).

La duración de cada una de estas fases ha dependido de la configuración del sistema poroso de cada material pétreo, puesto que las condiciones ambientales bajo las que se han desarrollado los ensayos han sido las mismas para todas las probetas.

Las rocas caracterizadas se han dividido en dos grupos en función de sus curvas de desorción. Para cada uno de los dos grupos diferenciados se ha incluido a modo de ejemplo una gráfica de desorción, mientras que las gráficas de todas las rocas caracterizadas se exponen en el anexo 1.

Rocas grupo A:

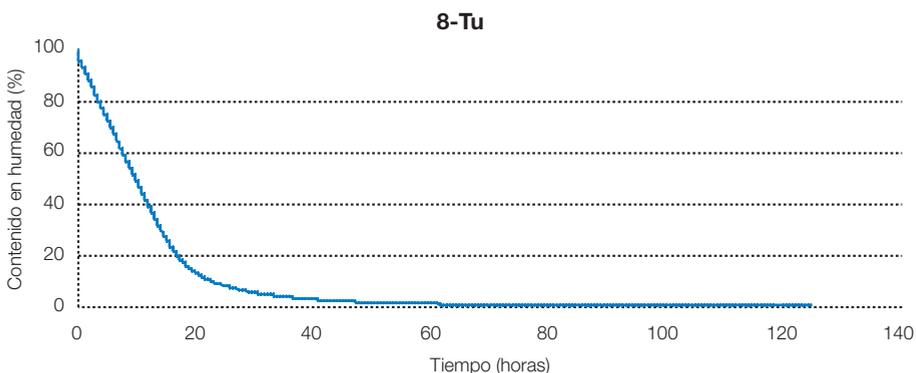
Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-12) muestran un proceso de desorción rápido, lo que implica un menor tiempo de permanencia de la humedad en su interior, aunque la efectividad del proceso es variable en función de las características intrínsecas de cada roca. Las rocas detríticas, y en menor medida las rocas recristalizadas dolomíticas, son las que presentan una menor eficacia en el secado con una mayor retención de agua. Las rocas incluidas en este grupo son:

Biomicitras porosidad superior al 10%: 8-Tu, 9-Fr.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 16-VI-I, 17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II, 27-Tr, 30-D y 31-BI1-2-3
Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

■ FIGURA VI.12

Curva de evaporación en la roca 8-Tu (grupo A)



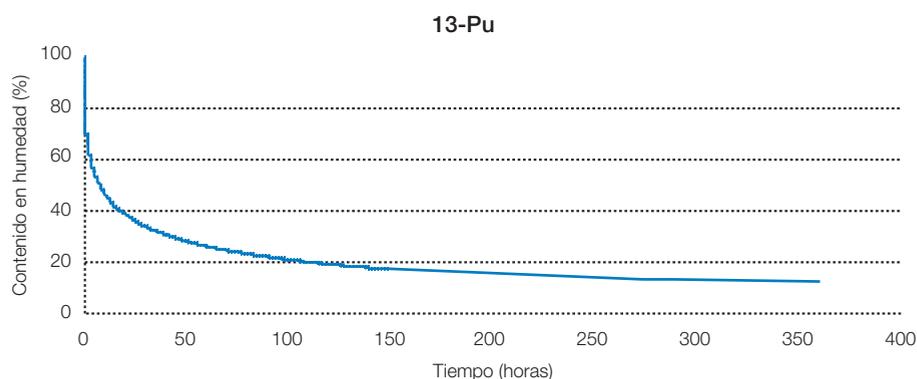
Rocas grupo B:

Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-13) presentan un elevado contenido en agua crítico lo que implica un proceso de secado lento y, en general, poco eficaz; que genera un mayor tiempo de permanencia de la humedad en el interior del sistema poroso. Este es un factor desfavorable frente a la alteración. La retención de agua tras secado es variable siendo especialmente elevada en 12-Ca, 13-Pu y 29-A. Las rocas incluidas en este grupo son:

Biomicitras-pelmicitras porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 29-A y 28-Crt.

■ FIGURA VI.12

Curva de evaporación en la roca 13-Pu (grupo B)



Los parámetros calculados a partir de las gráficas de desorción continua se muestran en la tabla VI-12.

El contenido en agua crítico es especialmente elevado, al igual que la retención de agua tras secado, en las biomicritas 29-A, 12-Ca, 13-Pu y 28-Crt con valores de 83%, 81%, 74% y 59% respectivamente. También presentan un contenido en agua crítico importante la roca carbonatada recristalizada 30-D (39%) y las arenitas 7-Ay (35%) y 6-Un (30%). Este contenido en agua crítico indica una lenta velocidad de secado para estas rocas.

El resto de las rocas caracterizadas muestran contenidos en agua críticos bajos, lo que indica una buena conectividad de su sistema poroso con velocidades de secado altas y una elevada efectividad en el proceso de desorción.

Las rocas que presentan un secado más lento y menos eficaz dentro del grupo de las rocas carbonatadas son 12-Ca, 13-Pu y 29-A. Estas rocas presentan, dentro de este grupo, el menor tamaño medio de acceso de poro y, por lo tanto, la mayor superficie específica. Dentro del grupo de las arenitas, 6-Un y 7-Ay son las que tienen un secado más lento y menos eficaz y se caracterizan por tener los menores tamaños medios de acceso de poro dentro de su grupo.

Los resultados de la retención de agua tras secado muestran que las rocas que presentan mayores retenciones de agua son las rocas detríticas, biomicritas con porosidad inferior al 3% y las rocas recristalizadas dolomíticas.

■ TABLA VI.12

**Resultados del contenido de agua en desorción W_d (%) y contenido en agua crítico W_{cri} (%).
Rocas ordenadas en función del valor de W_d .**

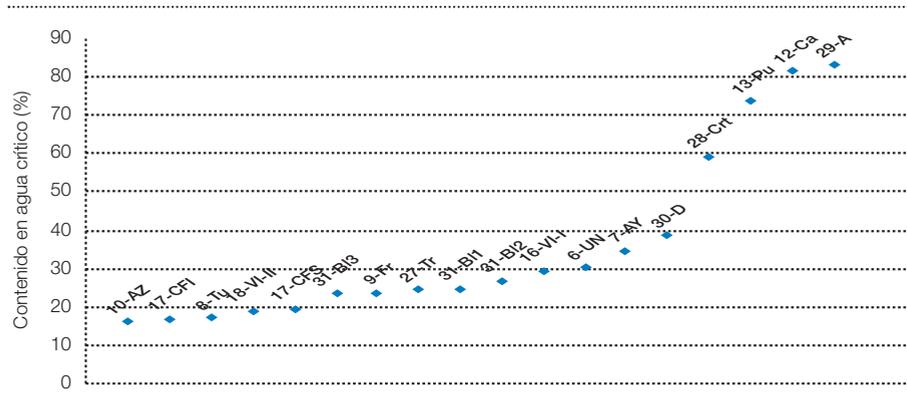
	W_d	W_{cri}
16-VI-I	0,24	29,38
17-CFI	0,32	16,93
27-Tr	0,74	24,64
8-Tu	1,06	17,35
9-Fr	1,24	23,81
17-CFS	1,41	19,56
18-VI-II	1,96	19,05
31-BI3	2,65	23,52
30-D	2,71	38,52
31-BI1	5,06	24,68
28-Crt	5,87	59,3
31-BI2	8,58	26,86
13-Pu	11,86	73,67
29-A	17,17	83,25
12-Ca	21,93	81,29
10-AZ	7,4	16,08
6-UN	13,48	30,34
7-AY	23,61	34,67

No existe una correlación entre tamaño medio de acceso de poro con el contenido de agua crítico y con la retención de agua tras secado, pero las rocas que muestran mayores porcentajes de accesos de poros inferiores a 0,1 micras son las que exhiben mayores valores para estos parámetros.

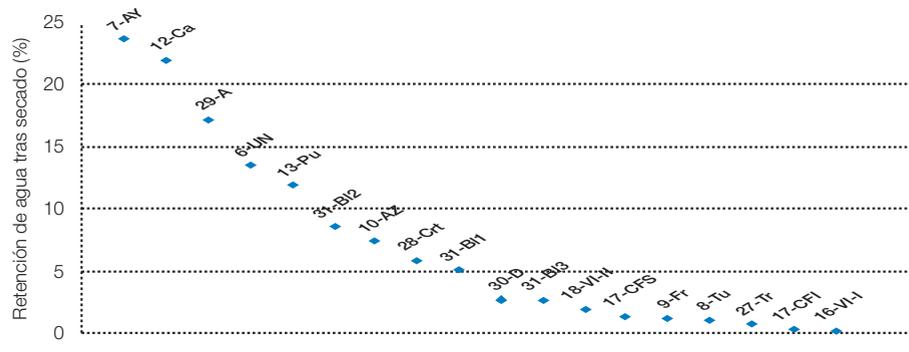
En las figuras VI.14 y VI.15 se presentan ordenados los diferentes tipos litológicos en función de su contenido en agua crítico y de su retención de agua tras secado.

■ FIGURA VI.14

Rocas ordenadas en función del contenido en agua crítico, W_{cri}



■ FIGURA VI.15

Rocas ordenadas en función de la retención de agua tras secado, W_d 

VI.4.1.4. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. UNE-EN 1925:1999

La succión capilar es un proceso que se produce espontáneamente al poner en contacto la superficie de un material poroso con el agua, como consecuencia del carácter hidrófilo que presentan los materiales pétreos (Torraca, 1982). El ascenso y volumen de agua que se introduce en el interior del material pétreo frente a la gravedad depende de la configuración de su sistema poroso. El mecanismo de succión capilar es una de las principales formas de penetración tanto de humedad como de sales en la roca siendo ambos agentes los principales responsables del desencadenamiento de diferentes procesos de degradación en la piedra natural.

En rocas con poros capilares $0,1 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$ (poros inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ son poros muy difícilmente accesibles al agua (Winkler, 1997)), la altura que alcanza el nivel de agua es inversamente proporcional al tamaño de dichos poros. Aunque el tamaño de poro es el factor principal, existen otros factores que ejercen una menor influencia tales como las condiciones ambientales (presión, temperatura y humedad) y la mineralogía de la roca.

Los gráficos y parámetros calculados a partir del ensayo de absorción capilar han sido:

Gráficas de absorción capilar

Las gráficas de absorción capilar muestran la variación en el tiempo del contenido en agua del material adquirido por el mecanismo de succión capilar.

Se han elaborado curvas experimentales a partir de los resultados obtenidos para el ensayo de absorción capilar en un sistema de coordenadas X/Y para observar la evolución de la absorción capilar a lo largo del tiempo. Es conocida –tanto teórica como experimentalmente– la dependencia de la cinética de los fenómenos capilares con la raíz cuadrada del tiempo (Vos, 1976; Mamillan, 1981; Kalimeris y Hall, 1983). En el eje de abscisas se ha representado el tiempo expresado en forma de raíz cuadrada del tiempo en segundos y en el eje de ordenadas se ha representado la masa de agua absorbida por unidad de superficie del área de la base de la probeta sumergida en metros cuadrados.

Absorción capilar (A.C.)

Se define como el incremento en masa para un tiempo (t) respecto a la superficie de succión:

$$A.C. = (m_t - m_d) / a$$

donde m_t es la masa de la probeta parcialmente sumergida en agua durante un tiempo t (gr), m_d es la masa de la probeta seca (gr) y a es el área de la cara de la probeta sumergida en agua expresada en m^2 .

Coefficiente de absorción capilar (C.A.C.)

El coeficiente de absorción capilar expresa la cantidad de agua absorbida y la rapidez con la que tiene lugar el proceso. El coeficiente de absorción capilar varía dependiendo del grado de interconexión del sistema poroso.

$$C.A.C = (m_t - m_d) / (a \cdot t_i^{1/2})$$

donde m_t y $t_i^{1/2}$ son un valor de ordenadas y abscisas para cualquier punto de la recta, m_d es la masa de la probeta seca (gr) y a es el área de la cara de la probeta sumergida en agua expresada en m^2 .

Grado de saturación Capilar (S_c)

Se define como el grado de saturación alcanzado por una roca mediante el mecanismo de succión capilar respecto al contenido máximo de agua que puede presentar en el punto de inflexión de la curva de absorción capilar.

$$S_c = [(m_t - m_d)/(m_s - m_d)] \times 100$$

donde m_t es la masa de la probeta parcialmente sumergida en agua durante un tiempo t (gr), m_d es la masa de la probeta seca (gr) y m_s es la masa de la probeta saturada (gr).

Discusión y resultados

Las curvas de absorción capilar permiten evaluar el comportamiento de los materiales pétreos durante el proceso de absorción capilar y relacionar este proceso con la porosidad efectiva del material y con el grado de conexión de su sistema poroso.

En las curvas de succión capilar puede diferenciarse dos fases:

Fase inicial: caracterizada por un incremento en peso lineal que se corresponde con el progresivo relleno de los poros interconectados (porosidad abierta). La pendiente de esta curva se denomina coeficiente de absorción capilar C.A.C. La duración de esta fase del ensayo depende tanto de las características del sistema poroso del material pétreo como de las características ambientales.

Fase final: caracterizada por una estabilización del contenido en agua con una absorción capilar muy lenta y una pendiente de la recta que tiende a estabilizarse asintóticamente.

Las rocas estudiadas se han dividido en dos grupos en función de sus curvas de absorción capilar. Para cada uno de los dos grupos diferenciados se ha incluido a modo de ejemplo una gráfica de absorción capilar, mientras que las gráficas de todas las rocas caracterizadas se exponen en el anexo 2.

Rocas grupo A:

Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-16) presentan una curva de absorción capilar en la que se diferencian claramente la fase inicial y la fase final, estando separadas las mismas por un cambio neto de pendiente. Las rocas incluidas en este grupo son:

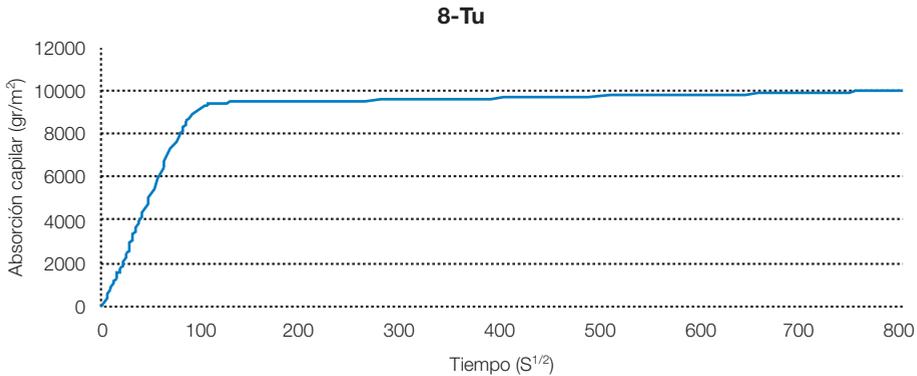
Biomicrotas porosidad superior al 10%: 8-Tu, 9-Fr.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 16-VI-I, 17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II, 27-Tr, 30-D, 31-BI1, 31-BI2 y 31-BI3.

Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

■ FIGURA VI.16

Curva de absorción capilar de 8-Tu (Grupo A)



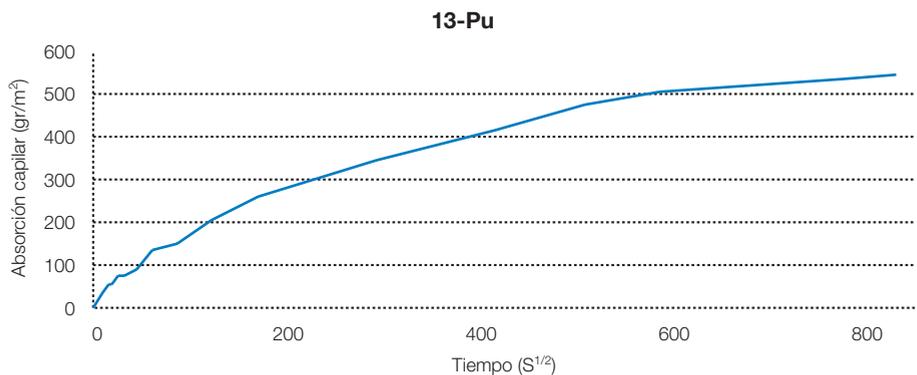
Estas rocas se caracterizan por una alta velocidad de absorción de agua por capilaridad, independientemente de la porosidad total del material, indicando una alta conectividad de su sistema poroso.

Rocas grupo B:

Las rocas incluidas en este grupo (figura VI-17) presentan una curva de absorción capilar que difiere sensiblemente del comportamiento ideal. Muestran unas curvas con una pendiente muy baja (por lo tanto tienen un bajo coeficiente de absorción capilar) consecuencia de un

■ FIGURA VI.17

Curva de absorción capilar de 13-Pu (Grupo B)



sistema poroso heterogéneo con una baja conectividad, en el que existen variaciones en el tamaño de los poros o en sus conexiones. Las rocas incluidas en este grupo son:

Biomicitras-pelmicitras porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A.

Los valores del grado de saturación capilar son elevados para las biomicitras con porosidad superior al 10% (8-Tu, 9-Fr) que alcanzan valores en torno al 85%, para las arenitas miocenas (10-Az, 6-Un y 7-Az) y para algunas de las rocas recristalizadas carbonatadas (16-VI-I, 31-BI, y 30-D) con valores superiores al 70%. Estos valores de S_c indican una buena intercomunicación de la red porosa. En cambio, las biomicitras con porosidad inferior al 3% (12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A) y las rocas recristalizadas (17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II y 27-Tr) presentan valores para S_c inferiores al 50% indicando una baja conectividad de su sistema poroso.

Los parámetros calculados a partir de las gráficas de absorción capilar se muestran en la tabla VI-13.

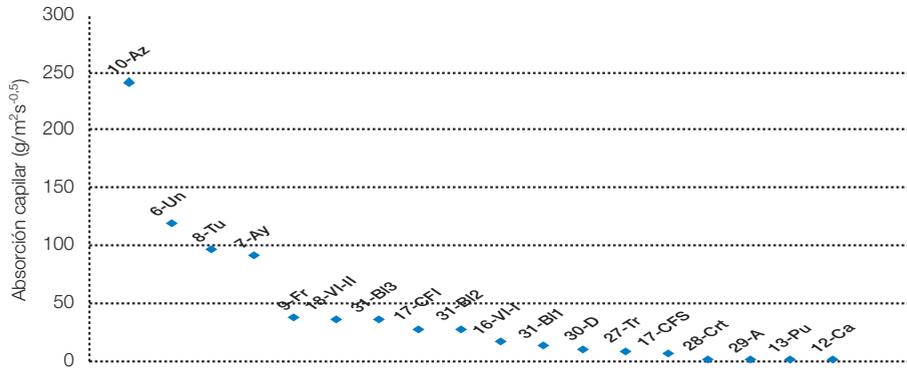
■ TABLA VI.13

Valores del coeficiente de absorción capilar C.A.C. ($\text{g/m}^2\text{s}^{-0.5}$), absorción capilar A.C (g/m^2) y grado de saturación S_c (%). Rocas ordenadas en función de su C.A.C.

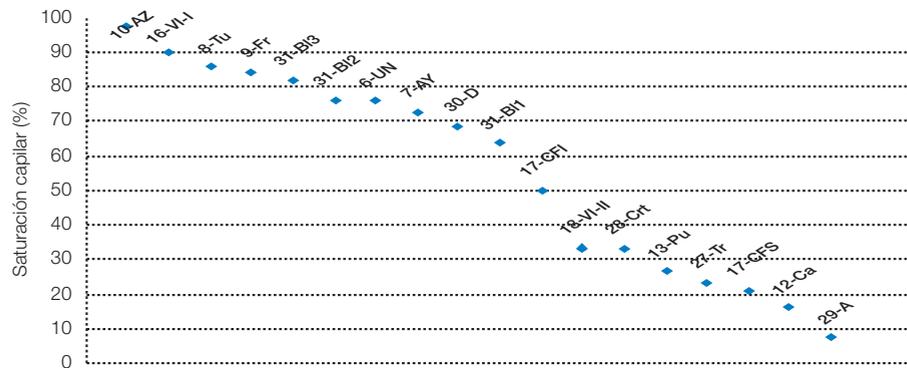
	Coeficiente de absorción capilar			A.C	S_c
	C.A.C.	Desv. típica	Coef. Var.		
8-Tu	96,18	4,763	0,05	10040,08	85,86
9-Fr	37,08	1,449	0,039	6296,02	84,4
18-VI-II	36,66	9,889	0,27	1406,16	33,45
31-BI3	35,69	6,297	0,176	4830,36	82,1
17-CFI	27,97	5,281	0,189	3631,57	50,22
31-BI2	27,85	6,847	0,246	5956,8	76,12
16-VI-I	16,43	5,714	0,348	3151,09	90,11
31-BI1	13,21	6,869	0,52	3340,08	63,65
30-D	10,4	0,989	0,095	1238,23	68,59
27-Tr	8,47	6,147	0,726	460,04	23,47
17-CFS	6,05	1,424	0,235	639,51	21,24
28-Crt	2,27	0,333	0,147	904,81	33,36
29-A	1,31	1,044	0,794	79,47	7,54
13-Pu	1,05	0,286	0,272	444,07	26,56
12-Ca	0,88	0,267	0,304	185,05	16,15
10-AZ	241,41	47,228	0,196	6547,77	97,52
6-UN	118,63	17,554	0,148	7436,02	75,81
7-AY	91,511	11,416	0,125	6279,97	72,66

En las figuras VI-18 y VI-19 aparecen ordenados los materiales en función de su coeficiente de absorción capilar y del grado de saturación capilar. Los materiales que presentan un coeficiente de absorción capilar más bajo son las biomicitras con porosidad inferior al 3%, mientras que los valores mayores de este coeficiente corresponden a las arenitas miocenas y a las biomicitras con porosidad superior al 10%. Las rocas recristalizadas se localizan en una posición intermedia entre las biomicitras con porosidad inferior al 3% y las arenitas miocenas y biomicitras con porosidad superior al 10%.

■ FIGURA VI.18

Rocas ordenadas en función de su coeficiente de absorción capilar

■ FIGURA VI.19

Rocas ordenadas en función del grado de saturación alcanzado en el punto de inflexión de la curva de absorción capilar**VI.4.2. PERMEABILIDAD**

La permeabilidad y la porosidad son dos parámetros diferentes. La permeabilidad se puede definir como la facilidad con la que un fluido de una viscosidad determinada fluye a través de la roca bajo un gradiente de presión (Allen *et al.*, 1988), mientras que la porosidad se define como la relación en porcentaje entre el volumen de los poros (abiertos y cerrados) y el volumen aparente de la probeta. La permeabilidad está controlada por el grado de interconexión entre los espacios vacíos, por la morfología y tamaño de estas conexiones y por la interacción del fluido con las paredes del sólido. La caracterización de la permeabilidad en materiales pétreos de usos constructivos permite predecir la respuesta frente a la alteración a largo plazo. Esta es una técnica no destructiva y portátil que permite obtener medidas espaciales de gran precisión.

Las rocas sedimentarias muestran variaciones en la permeabilidad de pequeña escala (mm) que pueden ser identificadas mediante el análisis geoestadístico. Esta técnica es especialmente útil en rocas sedimentarias donde las heterogeneidades no son visibles y, por tanto, es difícil predecir las localizaciones de las zonas de alta y baja permeabilidad.

El análisis geoestadístico de los datos de permeabilidad se utilizó inicialmente para la cuantificación de la variación espacial en diferentes reservorios de petróleo (Dreyer *et al.*, 1990; Dawas and Prosser, 1992; Jensen *et al.*, 1994; Prosser *et al.*, 1995; Prosser and Carter, 1997; Garland *et al.*, 1999). Posteriormente estas técnicas se aplicaron para relacionar la permeabilidad con características deposicionales y diagenéticas (Lloyd *et al.*, 2003; Mckinley *et al.*, 2004), así como para valorar la durabilidad de areniscas inalteradas en función de sus características texturales (McKinley *et al.*, 2006).

La geoestadística comprende un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio de una forma continua. El estudio estadístico empleado en este trabajo ha consistido en tres etapas:

Inicialmente se ha elaborado un resumen estadístico de la permeabilidad para cada una de las dos caras caracterizadas en cada probeta. Los parámetros calculados han sido: permeabilidad media, máxima, mínima, mediana, coeficiente de variación y coeficiente de asimetría.

En una segunda etapa se ha realizado el análisis estructural, mediante el cálculo del variograma teórico a partir de los datos de permeabilidad. Los variogramas son una herramienta para el análisis geoestadístico que permiten analizar la dependencia espacial de una propiedad (en nuestro caso la permeabilidad) sobre una zona dada.

Los variogramas se han obtenido estimando la diferencia de cuadrados entre todos los pares de medidas disponibles de una muestra y obteniendo la mitad de la media de todas las medidas separadas por una distancia determinada. Los variogramas muestran diferencias en la distribución espacial de la permeabilidad. El programa utilizado para calcular los variogramas ha sido Gstat (Pebesma and Wesseling, 1998).

El variograma puede ser estimado a partir del número de pares a una distancia h ($\rho(h)$): $z(x_\alpha)$, $z(x_\alpha+h)$, $\alpha = 1, 2, \dots, \rho(h)$ usando:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2\rho(h)} \sum_{\alpha=1}^{\rho(h)} \{z(x_\alpha) - z(x_\alpha + h)\}^2$$

En la figura VI-20 se muestra un ejemplo de variograma experimental. En abscisas se ha representado la distancia y en ordenadas los parámetros obtenidos a partir de los variogramas.

Rango: Distancia a la cual las medidas llegan a ser independientes unas de otras. El rango está correlacionado con las características texturales.

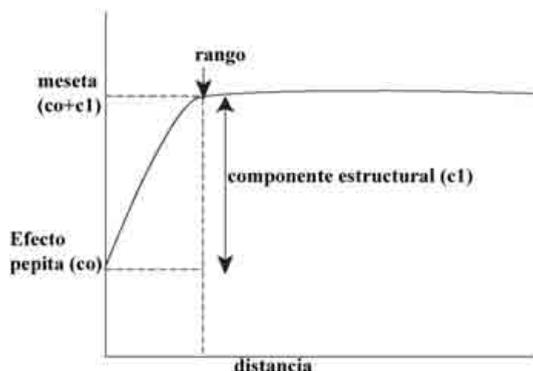
Distancia: La curva del variograma ha sido cortada a dos tercios de la distancia máxima entre 2 puntos de la muestra.

Efecto pepita (c_0): Puede deberse a dos posibles causas: errores de medición o microvariaciones del fenómeno estudiado. Si la microvariación es continua, la única razón para el efecto pepita sería un error de medición; pero sino lo es, se puede modelar el proceso a una escala muy pequeña como "ruido blanco". El efecto pepita está relacionado con la escala de observación y puede reducirse midiendo con un espaciado menor (Journel and Huijbregts, 1978).

Componente estructural (c_s): Representa la variación de la correlación espacial.

Meseta (c_0+c_s): Este valor es simplemente la varianza a priori de la función aleatoria. En estos casos, la covarianza existe y el proceso es estacionario de segundo orden.

■ FIGURA VI.20

Modelo de variograma experimental (tomado de McKinley *et al.*, 2006)

Efecto pepita relativo (%): Es un indicador de la variabilidad espacial. Cuanto mayor es este coeficiente, mayor es la variabilidad. Se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Efecto pepita relativo (\%)} = 100 - [(c_1 / c_0 + c_1) * 100]$$

En la tercera etapa se han utilizado los coeficientes obtenidos del variograma teórico para la estimación mediante kriging de la variable en los puntos no muestrales. El kriging es un método geoestadístico de interpolación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Es una técnica de interpolación que se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Dicho método calcula, a partir de una muestra de puntos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida. El valor estimado resulta un promedio ponderado de los valores vecinos y el peso estadístico dependerá de la relación espacial entre la zona no muestreada y los valores vecinos. Los mapas obtenidos con esta técnica muestran la variabilidad espacial de la permeabilidad en estos materiales.

Los componentes del variograma pueden ser relacionados, mediante un estudio petrográfico detallado, con las características texturales del material. El rango del variograma marca la escala o frecuencia de la variación espacial de la permeabilidad para cada tipo de roca. La variación espacial de la permeabilidad refleja las características de la cementación, el crecimiento diagenético de minerales (Cade *et al.*, 1994; Worden, 1998) y la presencia de características estructurales como laminación, estratificación, juntas, etc. (Carey and Curran, 2000).

La interpretación de los variogramas ha sido combinada con la interpretación petrológica para establecer el grado de variación en la permeabilidad, así como su relación con las características deposicionales y diagenéticas de estos materiales.

El estudio de la permeabilidad se ha realizado en 11 de las 15 rocas carbonatadas estudiadas debido a las limitaciones del permeámetro. Este ensayo no se ha podido realizar en rocas con poros de tamaño centimétrico (17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II y 27-Tr) como consecuencia de la pérdida del gas durante la realización del ensayo, ya que la abertura de salida del gas del permeámetro es únicamente de 8 mm de diámetro.

Discusión y resultados

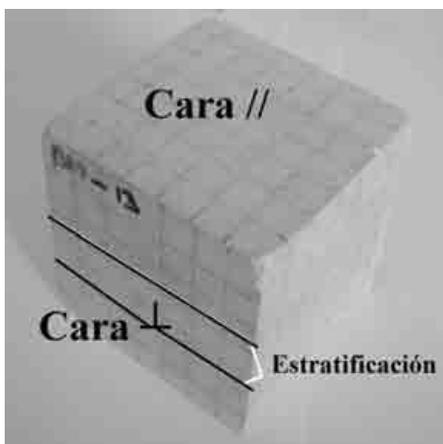
Los ensayos se han realizado en dos caras contiguas de cada material (figura VI-21), estas caras se han siglado como \perp (cara perpendicular a la estratificación y en la que se han tomado medidas de permeabilidad paralelas a los planos de estratificación) y $//$ (cara paralela a la estratificación y en la que se han tomado medidas de permeabilidad perpendiculares a la estratificación).

Los valores de los parámetros calculados a partir de las medidas de permeabilidad en las caras \perp y $//$ para cada una de las rocas caracterizadas, así como los componentes de los variogramas de las rocas en las que ha sido posible su elaboración aparecen en las tablas VI-14 y VI-15 respectivamente. Aquellas rocas en las que no ha sido posible ajustar el variograma no presentan un control estructural para la variación de la permeabilidad a la escala en la que estamos trabajando.

Este estudio estadístico se ha completado con histogramas de frecuencia de distribución de la permeabilidad, variogramas y mapas de distribución espacial de la permeabilidad. En la figura VI-22 se muestra un ejemplo de las fichas elaboradas para cada una de estas rocas, mientras que en el anexo 3 se recogen las fichas de todas las rocas caracterizadas.

■ FIGURA VI.21

Orientación de las caras en las que se han realizado las medidas de permeabilidad



■ FIGURA VI.22

Ficha de la roca 31-BI1 con los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas

Sigla: 31-BI1

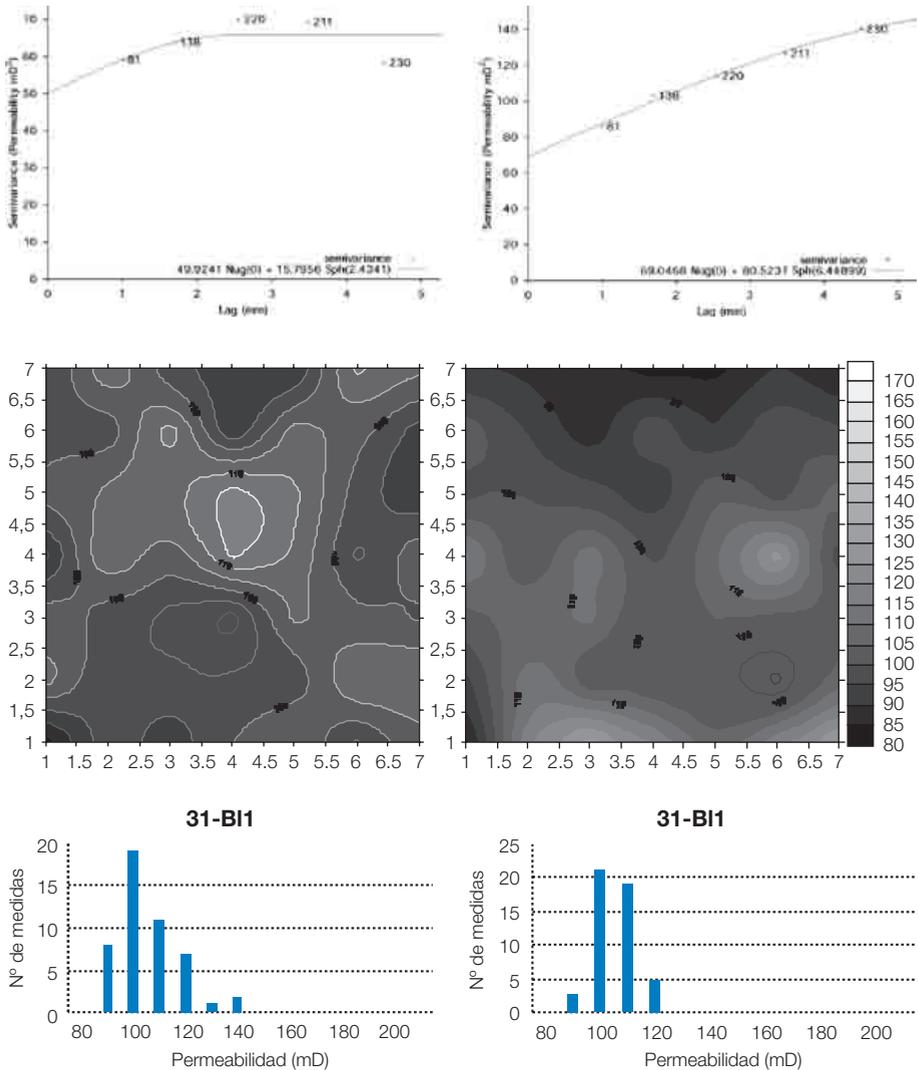
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 100,68 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 101,68 mD.



12-Ca Nombre científico: Biopelmicrita-Packstone de peloides y pelecípodos.

Localidad: Calatorao.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	107,4	49,3	85,7	135	105	12,10	0,11	0,55
⊥	120,5	54	85,00	139,00	119,00	11,24	0,09	-0,84

La caliza de Calatorao (12-Ca) se caracteriza por un comportamiento anisótropo respecto a la permeabilidad. El valor medio de permeabilidad es de 120,5 mD en la cara ⊥ y de 107,39 mD en la cara //.

Las medidas realizadas en ambas caras definen unos rangos y coeficientes de variación bajos y similares entre sí, lo que indica un comportamiento homogéneo del material frente a esta propiedad para cada orientación.

A partir de los datos de permeabilidad obtenidos no es posible ajustar el variograma. Este dato indica la inexistencia de un factor estructural que controle la distribución espacial de la permeabilidad en la escala en la que estamos trabajando, por lo que sugiere una mayor variabilidad en pequeñas distancias. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que el elemento textural que está controlando la variación espacial de la permeabilidad son las variaciones en el tamaño de la micrita.

13-Pu Nombre científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides.

Localidad: La Puebla de Albornón.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	129,07	42	110	152	128	8,49	0,07	-0,15
⊥	129,93	43	113,00	156,00	130,00	6,701	0,05	0,95

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
//	46,51	23,06	69,57	1,616	66,85

La caliza de la puebla de Albornón (13-Pu) presenta un valor de permeabilidad para ambas caras de 129 mD, indicando una elevada isotropía de este material respecto a la permeabilidad. El coeficiente de variación es inferior a 0,1 para ambas caras, lo que indica un comportamiento homogéneo del material frente a esta propiedad.

Los histogramas de frecuencia para esta roca muestran una fuerte asimetría positiva (predominio de valores altos de permeabilidad) en la cara ⊥, mientras que para la cara // muestran una distribución normal.

El variograma para el material inalterado define un ligero control estructural, aunque el efecto pepita es muy elevado. El rango es de 1,6 cm y representa la distancia a partir de la cual unas medidas son independientes de las otras. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que las galerías de bioturbación son las zonas donde se localizan los valores máximos de permeabilidad. El elevado efecto pepita relativo junto con el reducido rango sugieren la existencia de una importante variabilidad a escala de poro.

16-VI-I Nombre científico: Sparstone.

Localidad: Villarluego.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	124,42	37	107	144	125	7,31	0,06	-0,25
⊥	124,04	74	99,50	174,00	122,00	14,55	0,12	1,80

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥	89,23	124,37	213,60	4,69	41,77

La roca 16-VI-I presenta una permeabilidad en ambas caras de 124 mD, indicando una elevada isotropía de este material respecto a la permeabilidad. El coeficiente de variación es inferior a 0,12 para ambas caras, por lo que se puede inferir un comportamiento homogéneo del material frente a esta propiedad. En la cara ⊥ se observa una mayor dispersión en los valores de permeabilidad, presentando un rango para esta cara dos veces superior que para la cara //.

Los histogramas de frecuencia dibujan una fuerte asimetría positiva en la cara ⊥, mientras que para la cara // muestran una distribución normal.

Los variogramas de la roca fresca indican un alto control estructural en la permeabilidad y una alta variabilidad con un rango de 4,69 cm. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que el elemento textural que controla la permeabilidad es la variación de tamaño de la calcita, resultado de los procesos de recristalización que han tenido lugar en esta roca.

28-Crt Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico.

Localidad: Tortajada.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	126,98	28	114	142	127	6,20	0,05	-0,02
⊥	120,50	54	85	139	119	11,24	0,09	-0,84

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥	25,83	40,68	66,51	1,96	38,84

La roca 28-Crt se caracteriza por unos valores de permeabilidad de 120 mD para la cara ⊥ y de 127 mD para la cara //, indicando una ligera anisotropía de este material respecto a la permeabilidad. El rango y los coeficientes de variación son bajos para ambas caras, lo que apunta hacia un comportamiento homogéneo del material.

Los histogramas para esta roca muestran una fuerte asimetría negativa en la cara ⊥ (predominio de valores de baja permeabilidad), mientras que para la cara // definen una distribución normal.

Los variogramas estimados para este material indican la existencia de un control estructural con un rango de 1,9 cm. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que los elementos texturales que controlan las áreas de máxima permeabilidad son la variación en el tamaño de grano de la matriz y los parches esparíticos.

29-A Nombre científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides.

Localidad: Abanto.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	101,74	57,5	73,5	131	98,5	15,71	0,15	-0,08
⊥	97,13	41,6	79,40	121,00	93,80	11,29	0,12	0,50

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
//	70,08	180,69	250,77	1,39	27,94

La roca de Abanto 29-A presenta unos valores de permeabilidad de 97 mD para la cara ⊥ y de 102 mD para la cara //. El rango y los coeficientes de variación son bajos para ambas caras, lo que indica un comportamiento homogéneo del material.

Los histogramas para esta roca dibuja una ligera asimetría positiva en la cara ⊥, mientras que para la cara // muestran una distribución normal.

El variograma para la roca inalterada muestra la existencia de un fuerte control estructural con un rango de 1,29 cm y un efecto pepita relativo de 27,94%. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que las juntas estilolíticas son el elemento estructural que controla la variabilidad espacial de la permeabilidad en esta roca.

30-D Nombre científico: Sparstone.

Localidad: Abanto

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	112,65	36,8	96,2	133	114	9,80	0,09	0,69
⊥	114,35	51,6	82,40	134,00	115,00	11,26	0,10	-0,47

La roca 30-D presenta una permeabilidad media en roca fresca similar en ambas caras (114,35-112,65 mD), indicando una elevada isotropía de este material para la propiedad estudiada.

Los histogramas muestran una asimetría negativa en la cara ⊥, mientras que para la cara // es positiva.

A partir de los datos de permeabilidad obtenidos no es posible ajustar el variograma para esta roca. Este dato indica la inexistencia de un factor estructural que controle la variación de la permeabilidad en la escala en la que estamos trabajando. Esta roca es texturalmente muy homogénea por la intensa recristalización que ha tenido lugar, así como por los procesos de dolomitización-desdolomitización que han borrado su textura original. Esta carencia estructural apunta que los procesos de recristalización y cementación secundaria son responsables de la variación de la permeabilidad a escala de poro.

31-B11 Nombre científico: Dolosparstone.

Localidad: Blancas.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	100,68	36,5	82,5	117	99,9	7,88	0,10	0,58
⊥	101,68	49,3	82,70	132	99,50	12,01	0,12	0,62

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥	49,92	15,79	65,71	2,43	75,97
//	69,04	80,52	149,56	6,44	46,16

La roca 31-B11 presenta unos valores de permeabilidad de 101 mD para ambas caras, indicando un comportamiento isotrópico. El rango y los coeficientes de variación son bajos para ambas caras.

Los histogramas para esta roca muestran una ligera asimetría positiva para ambas caras, con tendencia hacia una distribución normal.

El estudio geoestadístico permite inferir la existencia de un fuerte control estructural en la distribución de la permeabilidad, presentando la cara paralela un control estructural mucho más

marcado (menor valor del efecto pepita relativo) que en la cara perpendicular. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que el elemento textural que controla la distribución de las zonas de alta y baja permeabilidad es la bioturbación.

31-BI2 Nombre científico: Dolosparstone.

Localidad: Blancas.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	130,31	47	108	155	129	10,37	0,08	0,05
⊥	126,46	58	99,00	157,00	128,00	12,88	0,10	-0,29

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥	68,04	100,02	168,07	1,45	40,48

La roca 31-BI2 presenta una permeabilidad media de 126,46 mD en la cara ⊥ y de 130,31 mD en la cara //. El rango y los coeficientes de variación son bajos para ambas caras, lo que indica un comportamiento homogéneo del material.

Los histogramas para esta roca muestran una ligera asimetría negativa en la cara ⊥, mientras que para la cara // definen una distribución normal.

El variograma en esta roca muestra la existencia de un fuerte control estructural con un rango de 1,46 cm y un efecto pepita relativo de 40,48%. El rango, junto con el estudio petrográfico, indican que la bioturbación de pequeña escala presente en el material junto con los parches esparíticos son los elementos texturales que controlan la variación espacial de la permeabilidad.

31-BI3 Nombre científico: Dolosparstone.

Localidad: Blancas.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	136,33	36	118	154	137	6,33	0,05	0,67
⊥	135,88	36	118,00	154,00	135,00	8,85	0,07	0,23

■ TABLA VI-15

Componentes del variograma

Cara	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥	48,51	29,33	77,85	2,48	62,318
//	16,73	26,06	42,79	1,70	39,100

La roca 31-BI3 presenta una permeabilidad media de 135,88 mD en la cara \perp y de 136,33 mD en la cara //. El rango y los coeficientes de variación son bajos para ambas caras, lo que indica un comportamiento homogéneo del material.

Los histogramas para esta roca muestran una ligera asimetría positiva y una cierta tendencia hacia una distribución normal en ambas caras.

Los variogramas indican un fuerte control estructural. Este control estructural está especialmente marcado en la cara //. El rango refleja las variaciones de tamaño de grano de la esparrta que aparecen formando bandeados en el material y que son, por tanto, el elemento textural que controla la variación espacial de la permeabilidad.

8-Tu Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Localidad: Tudela

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	131,95	34	111	145	136,5	11,26	0,09	0,57
\perp	124,9	47	102,00	149,00	124,00	14,99	0,12	-0,80

La caliza Campanil (8-Tu) presenta una permeabilidad media de 135,95 mD en la cara \perp y de 131,95 mD en la cara //. Las medidas realizadas en ambas caras tienen unos rangos y coeficientes de variación bajos, que indican un comportamiento homogéneo del material frente a esta propiedad.

Los histogramas para esta roca muestran una fuerte asimetría negativa en la cara \perp y una ligera asimetría positiva en la cara //. En ambos casos muestran una cierta tendencia de distribución bimodal.

Los mapas de permeabilidad apuntan hacia la existencia de un control estructural en la distribución de las zonas de alta y baja permeabilidad. Estos mapas, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que el elemento textural que controla la distribución de la permeabilidad en esta roca es la orientación preferente de los bioclastos (paralelos a la estratificación del material) junto con la bioturbación vertical.

9-Fr Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico.

Localidad: Fraga.

■ TABLA VI-14

Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad

Cara	Media (mD)	Rango (mD)	Mínimo (mD)	Máximo (mD)	Mediana (mD)	Desviación Std. (mD)	Coef. Variación	Coef. Asimetría
//	134,73	34	119	153	133	9,04	0,07	0,24
\perp	135,95	56	109,00	165,00	137,50	13,65	0,10	1,31

La caliza Campanil (9-Fr) presenta una permeabilidad media de 124,9 mD en la cara \perp y de 134,73 mD en la cara //. Las medidas realizadas en ambas caras presentan unos rangos y coeficientes de variación bajos, indicando un comportamiento homogéneo del material frente a esta propiedad.

Los histogramas para esta roca muestran para ambas caras una asimetría positiva, siendo más marcada en la cara \perp . Ambos histogramas tienden hacia una distribución normal de la permeabilidad.

La distribución de la permeabilidad en esta caliza no muestra ningún control estructural para la escala de trabajo. Los mapas de permeabilidad, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que los elementos texturales que controlan la distribución de la permeabilidad en esta roca son la bioturbación por raíces y la laminación por cambios en la recristalización de la matriz.

En la tabla VI-16 se recogen los valores de anisotropía calculados para cada una de las rocas caracterizadas. Las únicas rocas que presentan un cierto comportamiento anisótropo respecto de la permeabilidad son la caliza de Calatorao 12-Ca con una anisotropía de 10,88%, la caliza campanil de Tudela 8-Tu con una anisotropía del 4,58% y la caliza de Abanto 29-A con una anisotropía de 4,53%. El resto de las rocas caracterizadas presentan un valor muy bajo para el coeficiente de anisotropía, por lo que puede considerarse que tienen un comportamiento isótropo respecto a la permeabilidad.

■ TABLA V-16

Rocas ordenadas en función del valor del coeficiente de anisotropía para las medidas de permeabilidad

	Anisotropía (%)
12-Ca	10,88
8-Tu	4,58
29-A	4,53
31-BI2	2,95
28-Crt	2,87
30-D	1,49
9-Fr	1,47
31-BI1	0,98
13-Pu	0,65
31-BI3	0,33
16-VI-I	0,3

VI.4.3. Ultrasonidos

Los ultrasonidos son una técnica no destructiva que permite determinar la existencia de anisotropías en el interior de los materiales pétreos y evaluar su durabilidad y estado de deterioro sin la necesidad de muestrear el material.

Se ha calculado la variación de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en dos direcciones perpendiculares entre sí, antes y después de la saturación de las probetas y se ha calculado el índice de anisotropía de estas rocas respecto a la velocidad de propagación de ultrasonidos mediante la ecuación:

$$A = \frac{V_{pmax} - V_{pmin}}{V_{pmax}} \times 100$$

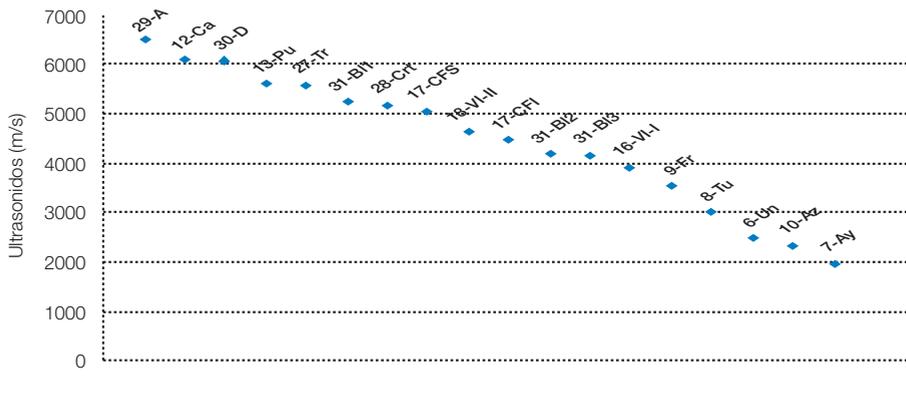
donde V_{pmax} es la velocidad de ultrasonidos máxima y V_{pmin} es la velocidad de ultrasonidos mínima.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En la figura VI-23 aparecen ordenados los materiales en función de su velocidad de propagación de ultrasonidos perpendicular a la estratificación para roca seca. Se observa como las velocidades mayores corresponden a las rocas con porosidad inferior (biomicritas con porosidad inferior al 3%), mientras que los valores más bajos corresponden a las rocas que tienen unos valores de porosidad total mayores (arenitas y biomicritas con porosidad superior al 10%). La velocidad ultrasónica está estrechamente relacionada con las características texturales de los materiales pétreos. Así, se observa como los valores más altos obtenidos para este parámetro corresponden a las biomicritas con porosidad inferior 3%, les siguen las rocas carbonatadas recristalizadas, las biomicritas con porosidad superior al 10% y las arenitas.

■ FIGURA VI.23

Rocas ordenadas en orden decreciente según su velocidad de propagación de ultrasonidos en roca seca y en la dirección perpendicular a la estratificación



Tras la saturación de las probetas ha tenido lugar un aumento en la velocidad de propagación de ultrasonidos, debido a la mayor velocidad de propagación de los ultrasonidos en el agua (1.485 m/s) que en el aire (331 m/s), que no ha sido homogénea para todas las rocas caracterizadas (tabla VI-17).

Las rocas que han tenido un aumento en la velocidad de propagación de ultrasonidos tras saturación inferior al 10% son:

- Biomicrocritas porosidad superior al 10%: 8-Tu, 9-Fr.
- Rocas recristalizadas carbonatadas: 17-CFI, 31-BI3.
- Arenitas porosidad superior al 5%: 7-Ay, 10-Az.

Las rocas que presentan un aumento en la velocidad de propagación de ultrasonidos tras saturación comprendida entre el 10% y el 20% son:

- Biomicrocritas-Pelmicrocritas porosidad inferior al 3%: 28-Crt, 29-A.
- Rocas recristalizadas carbonatadas: 17-CFS, 27-Tr, 30-D, 31-BI1, 31-BI2.
- Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un.

Las rocas con un aumento en la velocidad de propagación de ultrasonidos tras saturación superior al 20% son:

Biomicitas-Pelmicitas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 16-VI-I, 18-VI-II.

■ TABLA V-17

Resultados de la variación en tanto por ciento de la velocidad de propagación de ultrasonidos tras la saturación de la muestra en las direcciones paralela y perpendicular

	Paralela (%)	Perpendicular (%)
8-Tu	1,50	2,00
9-Fr	7,98	8,39
12-Ca	29,51	27,60
13-Pu	24,95	22,05
28-Crt	14,81	11,50
29-A	16,51	18,41
16-VI-I	29,90	32,63
17-CFI	9,48	6,97
17-CFS	20,33	9,88
18-VI-II	25,14	18,41
27-Tr	22,36	18,98
30-D	18,81	20,61
31-BI2	8,29	14,29
31-BI3	9,17	5,13
31-BI1	10,78	11,19
6-Un	16,39	10,55
7-Ay	-0,07	-0,17
10-Az	4,29	6,19

Los resultados del índice de anisotropía para la velocidad de propagación de ultrasonidos, tanto en la roca seca como saturada, indican una baja anisotropía textural respecto al ensayo de ultrasonidos. Tras la saturación del material tiene lugar un aumento generalizado en la anisotropía de ultrasonidos. Las únicas rocas que presentan un descenso en el índice de anisotropía tras la saturación son 6-Un y 28-Crt.

■ TABLA V-18

Resultados de los valores de anisotropía de la velocidad propagación de ultrasonidos tanto en roca seca como en roca saturada

	Anisotropía roca seca (%)	Anisotropía roca saturada (%)
8-Tu	7,83	8,3
9-Fr	0,54	0,98
12-Ca	0,24	2,41
13-Pu	5,4	8,91
28-Crt	2,69	1,08
29-A	1,84	4,07
16-VI-I	1,36	2,56
17-CFI	3,02	5,65
17-CFS	2,38	9,45
18-VI-II	4,44	12,33
27-Tr	1,4	2,81
30-D	0,09	2,3
31-BI2	2,08	8,49
31-BI3	3,01	7,15
31-BI1	3,4	3,84
6-Un	5,68	0,90
7-Ay	2,23	2,13
10-Az	1,95	3,90

VII. Conclusiones

En este capítulo se exponen las conclusiones más relevantes a las que se ha llegado con la realización de la presente tesis doctoral. Los objetivos principales con los que se planteo son:

Objetivo 1. **Caracterización tecnológica de 40 rocas de usos constructivos.**

Objetivo 2. **Caracterización petrofísica y de la durabilidad de 18 rocas ornamentales y piedras de cantería.**

Objetivo 3. **Desarrollo tecnológico de nuevas técnicas y/o perfeccionamiento de las existentes para la caracterización de materiales.**

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se presentan las siguientes conclusiones en relación con los objetivos planteados.

Caracterización tecnológica de 40 rocas de usos constructivos

- Las 40 rocas sedimentarias caracterizadas en la presente tesis doctoral poseen una gran relevancia, tanto por su actual uso en el sector de la Piedra Natural como materiales de usos constructivos, como por su intensa utilización en obras que han dejado una particular impronta en el variado patrimonio cultural y monumental español.
- Los ensayos normalizados de caracterización tecnológica son la herramienta que permite obtener datos objetivos para poder evaluar la idoneidad de uso de un material pétreo, aportando información sobre su aplicación y comportamiento a lo largo de su vida útil. El empleo de este tipo de ensayos permite la unificación de criterios de evaluación. La selección de los materiales pétreos de usos constructivos debe ser en función de sus características intrínsecas, condiciones ambientales y de su posición relativa tras su puesta en obra.
- **Se ha establecido una clasificación tecnológica de los materiales pétreos de usos constructivos caracterizados, correlacionando las propiedades físicas y mecánicas con las características petrográficas. Para cada uno de los 7 grupos diferenciados se han estableciendo recomendaciones de uso. Estos grupos son:**

Grupo 1. Las arenitas con porosidad inferior al 5% (Yesa (1-Ye), Martes (2-Ma), Ena (3-En), Fiscal (4-Hu), Pueyo de Araguás (5-Pa) y Tabuenca (11-Ta)) cumplen las solicitaciones más restrictivas respecto de los ensayos de resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión. Son aptas para su uso en pavimentación tanto interior como exterior (son rocas no heladizas) en zonas con todo tipo de tránsito, tanto peatonal como de vehículos (ligeros y pesados). Su elevada resistencia a compresión y flexión y su baja porosidad les hace también ser materiales muy aptos para su uso en mampostería y revestimiento.

Grupo 2. Las arenitas con porosidad superior al 5% (Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az)) poseen unos valores medios de resistencia mecánica que les otorgan un elevado valor industrial como piedras de cantería. Estos valores medios de resistencia mecánica permiten satisfacer tanto requerimientos de esfuerzos verticales como presentar una relativa facilidad para su extracción en cantera y su posterior dimensionado. Son aptas para su uso en mampostería y en función de la relación calcita/cuarzo y calcita/dolomita son aptas para su uso en pavimentación. Estas rocas son no heladizas, por lo que pueden ser utilizadas tanto en exterior como en interior.

Grupo 3. Las biomicritas-pelmicritas con porosidad inferior al 3% se han diferenciado en función de su uso constructivo predominante. Estas rocas cumplen las solicitaciones más restrictivas respecto de los ensayos de resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión. Son rocas no heladizas, excepto Mosqueruela (24-Mq23), por lo que pueden ser utilizadas tanto en exterior como en interior.

- A) Las biomicritas con uso ornamental (Calatorao (12-Ca1-2-3), Puebla de Albornón (13-Pu), Tortajada (28-Crt) y Abanto (29-A)) son aptas para su uso en revestimiento, mampostería y pavimentación interior y exterior con todo tipo de tránsito (tanto peatonal para usos colectivos intensos o moderados como de vehículos ligeros y pesados). Estos materiales admiten pulido, tras el cual poseen un elevado valor añadido como material ornamental pudiendo ser utilizados con fines decorativos.
- B) Las biomicritas con usos de cantería y lajas (Alacón (14-Al), Mosqueruela (23-Mq1, 24-Mq21-22-23-24) y Puertomingalvo (25-Pm)) son aptas para su uso en mampostería (siempre y cuando no sean heladizas) y pavimentación (el tipo de uso viene determinado por el ensayo de resistencia al deslizamiento y resistencia al desgaste por abrasión).

Grupo 4. Las biomicritas con porosidad superior al 10% (Tudela (8-Tu) y Fraga (9-Fr)) presentan, al igual que las arenitas miocenas, unos valores medios de resistencia mecánica que les otorgan un notable valor industrial como piedras de cantería. Son aptas para su uso en mampostería y pavimentación, tanto exterior como interior en zonas con usos peatonales colectivos moderados y con tránsito de vehículos ligeros.

Grupo 5. Las bioesparitas con porosidad inferior al 3% (Iglesuela (22-Ig), Nogueruelas (26-No) y Cantavieja (21-Cv)) sólo se comercializan como lajas debido a su modo de explotación. Cumplen las solicitaciones más restrictivas de tipo mecánico respecto de los ensayos de resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión. Se explotan únicamente los 2 metros superficiales que presentan un lajado natural por meteorización. Son aptas para su uso en pavimentación en zonas con uso peatonal colectivo moderado, mampostería y revestimiento, tanto interior como exterior por tratarse de rocas no heladizas.

Grupo 6. Las bioesparitas con porosidad superior al 3% (Villarluengo (19-To) y Mirambel (20-Mi)), al igual que las bioesparitas con porosidad inferior al 3%, sólo se comercializan como lajas. Presentan unos valores de resistencia mecánica a compresión y flexión medio-bajos. Son aptas para su uso en mampostería, revestimiento y pavimentación, tanto interior como exterior por tratarse de rocas no heladizas en zonas con usos peatonales colectivos moderados secas y húmedas con cualquier porcentaje de pendiente. Estos materiales admitirían un acabado pulido.

Grupo 7. Las rocas recristalizadas carbonatadas (Cuevas (15-Ce), Villarluengo (16-VI-I, 17-CF, 18-VI-II), Villalva (27-Tr), Abanto (30-D) y Blancas (31-BI)) presentan importantes diferencias en su comportamiento mecánico en función de su composición. Las rocas carbonatadas recristalizadas dolomíticas cumplen las solicitaciones más restrictivas de tipo mecánico respecto de los ensayos de resistencia a flexión y compresión, mientras que las rocas carbonatadas recristalizadas calcíticas presentan unos valores de resistencia mecánica a compresión y flexión medio-bajos. Estas rocas son aptas para su uso en revestimiento y mampostería y admiten pulido, tras el cuál poseen un elevado valor añadido como material ornamental pudiendo ser utilizado con fines decorativos.

Las rocas recristalizadas de composición dolomítica son aptas para su uso como pavimento en zonas con tránsito de vehículos pesados y zonas peatonales exteriores e interiores con usos colectivos intensos. Por su parte, las rocas recristalizadas de composición calcítica lo son únicamente para zonas con tránsito de vehículo ligeros y zonas interiores con usos colectivos moderados.

- **Se han establecido criterios de calidad técnica de los materiales pétreos caracterizados mediante la correlación de las propiedades físicas, mecánicas y las características petrográficas.**
- En las rocas areníticas se han encontrado correlaciones estadísticamente significativas entre porosidad y propiedades ingenieriles de las rocas. Existe una relación lineal e inversamente proporcional entre la porosidad y la resistencia mecánica a compresión, resistencia mecánica a flexión y resistencia mecánica al desgaste por abrasión, y una relación lineal y directamente proporcional entre porosidad y resistencia al deslizamiento (figura V-5).
- Para las rocas areníticas eocenas del Pirineo navarro-aragonés, con porosidad inferior al 3%, ha quedado puesto de manifiesto que las variaciones en la resistencia mecánica están fuertemente influenciada por la mineralogía y por las características texturales. La resistencia mecánica en estas rocas aumenta con el descenso tanto de la porosidad como del porcentaje de fragmentos líticos y aumenta con el porcentaje de cemento (tabla V-7).
- En las rocas carbonatadas la resistencia mecánica del material esta estrechamente relacionada con sus características texturales (figura V-9). Se ha desarrollado un modelo general para la predicción de la resistencia mecánica a compresión y flexión en rocas carbonatadas pertenecientes a diferentes grupos texturales, obteniendo unos parámetros de correlación estadísticamente significativos ($R = 0,86$) (figuras V-7 y V-8). Los parámetros petrográficos que determinan la resistencia a la compresión simple en las rocas carbonatadas son la porosidad y el porcentaje de cemento, mientras que los parámetros petrográficos que determinan la resistencia a la flexión son la porosidad, el porcentaje de cemento y el porcentaje de matriz.
- La resistencia al desgaste por abrasión tanto en las rocas detríticas como en las rocas carbonatadas no recristalizadas esta condicionada por su composición mineralógica. Para rocas clasificadas en un mismo grupo tecnológico, la resistencia al desgaste por abrasión es mayor en aquellas rocas que presentan valores menores para las relaciones calcita/dolomita y calcita/cuarzo.
- El análisis estadístico de la varianza ANOVA es la herramienta que permite discernir el posible comportamiento anisótropo del material. Las anisotropías en las propiedades físicas y mecánicas controlan en gran medida las pautas de alteración de los materiales pétreos de usos constructivos e implican una limitación en el uso del material en función de la orientación.
- Las rocas areníticas caracterizadas presentan un comportamiento isótropo respecto a los ensayos de resistencia a compresión y de resistencia al desgaste por abrasión, con la excepción de la arenita de Ayerbe (7-Ay), y respecto al ensayo de flexión, con la excepción de las arenitas de Alcañiz (10-Az), Fiscal (4-Hu) y de Pueyo de Araguás (5-Pa).
- Las rocas carbonatadas se comportan de una manera isótropa respecto a los ensayos de resistencia mecánica a compresión y resistencia al desgaste por abrasión. Respecto al ensayo de resistencia mecánica a flexión, las rocas recristalizadas muestran un comportamiento isótropo, mientras que las bioesparitas y las biomicitras tienen un compor-

tamiento preferentemente anisótropo. Las rocas caracterizadas que se emplean principalmente como roca ornamental poseen un comportamiento isótropo respecto al ensayo de resistencia al choque y un comportamiento anisótropo respecto al ensayo de Microdureza Knoop.

Caracterización petrofísica y de la durabilidad de 18 rocas ornamentales y piedras de cantería.

Para esta parte del trabajo se han seleccionado las rocas que se comercializan como rocas ornamentales y, aquellas que comercializándose como piedras de cantería presentan un mayor valor tanto científico como histórico por su uso a lo largo del tiempo.

- **Se ha realizado una descripción del sistema poroso para cada uno de los grupos tecnológicos diferenciados a partir de los datos obtenidos por el estudio petrográfico, la porosimetría de inyección de mercurio y los ensayos hídricos.**
- Los diferentes minerales que se encuentran en las rocas caracterizadas poseen diferentes formas y tamaños que determinan la estructura porosa del material. En general, cuanto mayores son los granos, mayor es la porosidad y mayores son los poros y las conexiones entre ellos.
- Los cristales de calcita de tamaño micrométrico que conforman la micrita originan la formación de poros de pequeño tamaño en las calizas micríticas. Los cristales de dolomita, la microesparita y el cemento carbonatado tanto calcítico como dolomítico en las rocas carbonatadas inducen la formación de poros de pequeño tamaño aunque superiores a los originados por la micrita (figura VI-24). Variaciones en el grado de cementación en la roca originan cambios en las características del sistema poroso.

Grupo 1. Arenitas con porosidad superior al 5% (Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az). La roca 10-Az tiene una buena conectividad de su sistema poroso con elevadas velocidades de absorción, succión capilar y secado. Los resultados de los ensayos hídricos, en 6-Un y 7-Ay, indican una conectividad menor en su sistema poroso que en la roca 10-Az, con una desorción mas lenta y menos eficaz. Las arenitas de 6-Un y de 7-Ay poseen unos porcentajes de macroporosidad y un tamaño medio de acceso de poros similar entre sí, mientras que la arenita 10-Az presenta un mayor porcentaje de macroporosidad y un mayor tamaño medio de acceso de poro. Las tres rocas poseen más del 45% de su volumen de accesos de poro mayor de 1 μm (tabla VI-19).

Grupo 2. Las biomicritas-pelmicritas con porosidad inferior al 3% (Calatorao (12-Ca1-2-3), Puebla de Albornón (13-Pu), Tortajada (28-Crt) y Abanto (29-A)), presentan un sistema poroso tortuoso, heterogéneo, compuesto por accesos de poros de pequeño tamaño y con una baja conectividad. Se caracterizan por una velocidad de absorción baja, una desorción lenta y poco efectiva y una absorción capilar reducida, mostrando los valores más bajos de todas las rocas caracterizadas para el contenido de agua en 1 hora y los valores más elevados de contenido en agua crítico. Las rocas pertenecientes a este grupo poseen el tamaño medio de acceso de poro inferior de todas las rocas caracterizadas. Más del 86% de sus radios de acceso de poro son inferiores a 0,1 μm (tabla VI-20).

Grupo 3. Las biomicritas con porosidad superior al 10% (Tudela (8-Tu) y Fraga (9-Fr)) presentan un sistema poroso homogéneo, bien comunicado y con accesos de gran tama-

ño. La cinética de los procesos de absorción y desorción de agua se producen con celeridad, con una rápida transferencia del agua absorbida hacia el exterior y una baja retención de agua. El bajo contenido de agua crítico indica una velocidad de secado media-alta. Estas rocas poseen más del 65% de su volumen de accesos de poro pertenecientes al rango 0,1-1 μm (tabla VI-21).

Grupo 4. Las rocas recristalizadas carbonatadas con porosidad comprendida entre el 3 y el 10% (Cuevas (15-Ce), Villarluego (16-VI-I, 17-CF, 18-VI-II), Villalva (27-Tr), Abanto (30-D) y Blancas (31-BI)), presentan un sistema poroso bien comunicado que permite el movimiento de agua en su interior a través de los accesos de tamaño medio-grande. El proceso de desorción es muy eficaz, lo que asegura una rápida transferencia hacia el exterior del agua absorbida y una baja retención de agua. El contenido de agua crítico es inferior al 30%, indicando una velocidad de secado media alta. Estas rocas se han clasificado como pertenecientes a los grupos II (más del 65% de su volumen de accesos de poro pertenece al rango 0,1-1 μm) y III (más del 45% de su volumen de accesos de poro son mayores de 1 μm) por porosimetría de mercurio (tabla VI-22).

- **La dinámica de los fluidos en el interior del sistema poroso de los materiales pétreos antes y después de la aplicación de productos de conservación se ha correlacionado con sus características petrográficas (textura, mineralogía) y en especial con la configuración del sistema poroso.**
- La correlación entre propiedades hídricas y características del sistema poroso en rocas sedimentarias indica que los procesos de absorción, desorción y absorción capilar están más controlados por la geometría del sistema poroso, tamaño medio de acceso de poro y porcentaje de accesos de poros inferiores a 0,1 μm , que por la porosidad efectiva que presentan las rocas.
- El grado de saturación de las rocas en los estadios iniciales del ensayo de absorción, así como la absorción capilar, están controlados por el tamaño medio de acceso de poro, siendo mayor el valor de estos parámetros conforme aumenta el tamaño medio de acceso de poro. Los valores mayores para el coeficiente de saturación y para el coeficiente de absorción capilar corresponden a las biomicritas con porosidad superior al 10%, arenitas y rocas carbonatadas recristalizadas.
- El secado de los materiales pétreos muestra una buena correlación con el porcentaje de tamaños de acceso de poro inferiores a 0,1 μm y no con el tamaño medio de acceso de poro. Las variedades pétreas que tienen un mayor porcentaje de tamaños de acceso de poro inferiores a 0,1 μm , biomicritas con porosidad inferior al 3%, presentan un elevado contenido de agua crítico, una mayor retención de agua tras secado y un menor grado de saturación durante la absorción capilar.
- Tras la consolidación de las rocas (Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az)) con silicato de potasio y con silicato de litio tiene lugar en los estadios iniciales e intermedios del ensayo de absorción una aceleración en el proceso de absorción de agua en la probeta tratada (figura VIII-6). Esta aceleración se debe a una homogeneización del sistema poroso por la precipitación parcial del consolidante tapizando los poros de mayor diámetro en las zonas con "cuellos de botella", creando una red porosa con tamaño medio de poro inferior pero con mayor regularidad en la sección de sus conductos. Esta regularización en el tamaño de los poros implica un aumento en la presión de succión capilar.

- **La durabilidad de estos materiales se ha evaluado mediante el ensayo de cristalización de sales. Los resultados obtenidos para este ensayo indican que la roca dolomítica recristalizada de Blancas (31-BI2) y las arenitas miocenas de Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az) presentan los valores más elevados de pérdida en peso. El resto de las rocas caracterizadas presentan pérdidas en peso tras el ensayo de cristalización de sales inferiores al 0,5% (tabla VII-2).**
- Dentro del grupo de las arenitas, el mayor deterioro de Uncastillo (6-Un) y Ayerbe (7-Ay) es consecuencia del mayor porcentaje de microporosidad y el menor tamaño medio de acceso de poro respecto a Alcañiz (10-Az). Los resultados de los ensayos hídricos en Uncastillo (6-Un) y Ayerbe (7-Ay) indican una conectividad menor en su sistema poroso que en Alcañiz (10-Az), con una desorción más lenta y menos eficaz.
- **No existe a priori un producto determinado que mejore las características del material y, por ello, es necesario realizar la caracterización para cada tipo rocoso.** Las tres arenitas caracterizadas presentan una mayor penetración tanto en profundidad como en volumen para los silicatos alcalinos que para el Paraloid B-72. La penetración de los consolidantes en la roca de Blancas (31-BI2) ha sido inferior a la registrada en las arenitas.
- En la roca de Blancas (31-BI2) la aplicación de los tres productos implica un aumento en la resistencia del material frente al deterioro por cristalización de sales, un aumento en la dureza superficial, una variación cromática prácticamente nula y unas variaciones del mismo orden en las propiedades hídricas. Los resultados obtenidos indican la aptitud de los tres consolidantes para su uso en este material (tabla VIII-9).
- Los resultados obtenidos en las arenitas de Uncastillo (6-Un) y Ayerbe (7-Ay), para el ensayo de cristalización de sales, desaconsejan el uso tanto del Paraloid aplicado por ambos métodos como del silicato de litio aplicado por brocha. El mayor poder consolidante en estas rocas lo presenta el silicato de potasio aplicado por inmersión (tabla VIII-9).
- Los resultados obtenidos en la arenita de Alcañiz (10-Az) desaconsejan el uso tanto del Paraloid como del silicato de litio aplicados por ambos métodos. El mayor poder consolidante en esta roca lo presenta el silicato de potasio aplicado por inmersión (tabla VIII-9).
- **La aplicación de la técnica de la permeabilidad al gas a la caracterización de materiales pétreos de usos constructivos junto con el estudio petrográfico ha permitido establecer la susceptibilidad a la alteración de estas rocas. Este método es el más detallado que existe para evaluar la alterabilidad potencial de los materiales pétreos en los estadios iniciales del deterioro, ya que la permeabilidad es un parámetro que va cambiando conforme avanza la alteración del material y permite predecir cual será el comportamiento del material tras su puesta en obra.**
- Los resultados obtenidos a partir de la medida de la variación espacial de pequeña escala de la permeabilidad, entre materiales inalterados y alterados, permiten determinar la modificación en el flujo de fluidos que se origina en el interior de los materiales pétreos durante los estadios iniciales del deterioro proporcionando las bases para predecir las áreas con una mayor alterabilidad.
- Las características texturales y estructurales de las rocas que les confieren una mayor alterabilidad son: zonas bioturbadas (Fraga (9-Fr), Puebla de Albortón (13-Pu) y Blancas (31-BI1 y 31-BI2)), recristalizaciones de la matriz a microesparita y pseudoesparita (Fraga

(9-Fr), Puebla de Albornón (13-Pu), Villarluego (16-VI-I), Tortajada (28-Crt) y Blancas (31-BI3)), discontinuidades como las juntas estilolíticas (Abanto (29-A)), orientaciones preferentes de componentes de la roca (Tudela (8-Tu)) y parches esparíticos (Blancas (31-BI2) y Tortajada (28-Crt)). En una misma probeta, estas características texturales y estructurales se verán más o menos alteradas en función de su posición relativa, ya que el movimiento de las sales está influenciado por el régimen de secado. En este ensayo todas las probetas han sido sometidas a un secado lento y prolongado.

- **Se han establecido modelos de comportamiento del material durante los estadios iniciales del deterioro correlacionando la variación en la permeabilidad con las características del sistema poroso (tabla VII-11).**
- Los materiales pétreos con porcentajes importantes (superiores al 85%) de sus tamaños de acceso de poro inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ no se ven alterados durante los estadios iniciales de los ensayos de cristalización de sales: biomicritas con porosidad inferior al 3% (Calatorao (12-Ca1-2-3), Puebla de Albornón (13-Pu) y Tortajada (28-Crt)), a no ser que tengan algún tipo de discontinuidad abierta que permita la entrada preferente de la disolución salina como en la biomicrita de Abanto (29-A). En las rocas 12-Ca, 13-Pu y 28-Crt el proceso dominante es la precipitación de sales y sellado superficial (passive pore filling) y en la roca 29-A el proceso predominante es la cristalización de sales y génesis de nuevos poros y/o fisuras.
- Los materiales pétreos con porcentajes importantes (superiores al 85%) de sus tamaños de acceso de poro superiores a $0,1 \mu\text{m}$ se ven preferentemente alterados durante los estadios iniciales del ensayo de cristalización de sales (biomicritas con porosidad superior al 10% y rocas recristalizadas tanto calcíticas como dolomíticas). La única excepción es la roca de Blancas (31-BI3) tras la cristalización de sulfato de magnesio. En estas rocas el proceso predominante es la cristalización de sales y génesis de nuevas poros y/o fisuras en el interior del material pétreo o ensanchamiento de las previas debido a la presión ejercida por las sales durante su cristalización.
- **La caliza Campanil de Tudela (8-Tu) presenta una propiedad peculiar, posee una expansión hídrica muy baja que se incrementa durante el secado en presencia de soluciones salinas de sulfato de magnesio. La repetición cíclica de las tensiones internas que se originan durante la cristalización de sales provoca la fisuración y fractura de la roca en paramentos pétreos en tiempos muy cortos. La expansión media medida es de 4 mm/m .**
- Las calizas Campaniles de Tudela (8-Tu) y Fraga (9-Fr) son desde el punto de vista geológico calizas del Páramo con una edad y microfacies semejantes. Sin embargo, la caliza campanil de Fraga no presenta problemas por expansión durante el secado en presencia de sales de magnesio por lo que es un material apto para su uso en obra civil moderna y como material de sustitución en restauración.
- Del análisis direccional y de la forma de los elipsoides magnéticos se extrapola la existencia de cambios texturales en la caliza campanil de Tudela (8-Tu). La fábrica magnética cambia de anisótropa a isotropa tras la cristalización de la solución de sulfato magnético.
- La naturaleza de este proceso no está del todo clara y es necesario continuar con la investigación del fenómeno. Parece probable que los factores determinantes de esta patología sean el sistema poroso y la materia orgánica presente en la roca. La utilización

conjunta de diferentes variedades pétreas puede acelerar el proceso de deterioro, por ello, es imprescindible la selección y control de calidad y compatibilidad de los material antes de su puesta en obra.

Desarrollo tecnológico de nuevas técnicas y/o perfeccionamiento de las existentes para la caracterización de materiales

- La realización de los ensayos necesarios en la presente tesis doctoral ha supuesto el desarrollo tecnológico de los ensayos de absorción y desorción automatizados. Con este novedoso procedimiento se ha conseguido un registro continuo de la totalidad del ensayo y se han evitado los posibles errores debidos a la manipulación de las probetas durante la realización de los ensayos. Esta automatización ha permitido caracterizar en detalle variaciones en la cinética de los procesos de absorción y desorción de agua.
- El tratamiento de los datos obtenidos a partir de los numerosos ensayos de absorción y desorción realizados en el marco de la presente tesis doctoral nos ha permitido el desarrollo de una nueva técnica para el cálculo de la distribución de tamaños de poro en materiales pétreos. Con fecha de prioridad 22/12/2005 ha sido solicitada la patente internacional PCT WO 2007/071802 A1. "Porosimeter measuring the intrusión of low-density fluids".
- Se ha automatizado el ensayo de expansión lineal consiguiendo un registro continuo de la totalidad del ensayo. Este ensayo se ha completado con la medida de las variaciones de volumen mediante el Object Scan 3D permitiendo caracterizar las variaciones de volumen a lo largo del ensayo.
- La adecuación de técnicas estadísticas preexistentes (Variogramas, Kriging) a los resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad al gas ha permitido determinar los elementos texturales y estructurales que presentan una mayor alterabilidad en los estadios iniciales del deterioro. Estas determinaciones permiten predecir como se comportará el material tras su puesta en obra y permiten realizar una correcta adecuación de uso en función de su alterabilidad.

Consejo Económico y Social de Aragón

COMPOSICIÓN DEL PLENO (a 30/6/2010)

PRESIDENCIA

D.^a Ángela Abós Ballarín (en representación del Gobierno de Aragón)

VICEPRESIDENCIAS

D.^a Marta Arjol Martínez (en representación de las Organizaciones Sindicales)

D. José Luis López Garcés (en representación de las Organizaciones Empresariales)

SECRETARÍA GENERAL

D.^a Belén López Aldea (en representación del Gobierno de Aragón)

VOCALÍAS

En representación del Gobierno de Aragón

Titulares

D.^a Ángela Abós Ballarín
 D. José Luis Gracia Abadía
 D. Guillermo Herraiz Medel
 D.^a Belén López Aldea
 D. Antonio Mostalac Carrillo
 D.^a Eva Pardos Martínez
 D. Mariano Ramón Gil
 D. José Félix Sáenz Lorenzo
 D. Marcos Sanso Frago

Suplentes

D. José Aixala Pasto
 D. José Luis Briz Velasco
 D. Javier Celma Celma
 D. Jesús Díez Grijalvo
 D.^a María José González Ordovás
 D.^a Carmen Magallón Portolés
 D. José Montón Zuriaga
 D. Jorge Pardo Navarro
 D. Elisardo Sanchís Sancho

En representación de las Organizaciones Sindicales

Designados por la Unión General de Trabajadores (UGT Aragón):

Titulares

D. Daniel Alastuey Lizáldez
 D.^a Carmen García Nasarre
 D. Julián Lóriz Palacio
 D.^a Carmina Melendo Vera*
 D. Luis Tejedor Cadenas

Suplentes

D. Javier Asensio Galdeano
 D. Luis Laguna Miranda
 D. Raúl Machín Lapeña
 D. Ricardo Rodrigo Martínez
 D. José Antonio Cid Felipe*

Designados por la Unión Sindical de Comisiones Obreras (CC.OO. Aragón):

D.^a Marta Arjol Martínez
 D. Julián Buey Suñén
 D. Manuel Martínez Morales*
 D. Eduardo Navarro Villarreal

D. Carmelo Javier Asensio Bueno
 D.^a Rosina Lanzuela Irazo
 D.^a Margarita Lasmarías Bustín
 D. Javier Sánchez Ansó

* Nombramiento pendiente de publicación en BOA.

En representación de las Organizaciones Empresariales

Designados por la Confederación Regional de Empresarios de Aragón (CREA):

Titulares

D. José Luis López Garcés
 D. Carlos Mor Sanz
 D. Jesús Morte Bonafonte
 D. José Enrique Ocejo Rodríguez
 D.ª Rosa Santos Fernández

Suplentes

D. Jorge Alonso Vallejo
 D. Sergio Calvo Bertolín*
 D.ª Beatriz Callén Escartín
 D. Juan Carlos Dehesa Conde
 D. José María García López

Designados por la Confederación de la Pequeña y Mediana Empresa Aragonesa (CEPYME ARAGÓN):

Titulares

D. Enrique Bayona Rico
 D. Salvador Cored Bergua
 D. Aurelio López de Hita
 D. Carmelo Pérez Serrano

Suplentes

D. Guillermo Arrizabalaga Lizarraga*
 D.ª Pilar Gómez López
 D. Antonio Hinojal Zubiaurre
 D. Carlos Salcedo Merino

COMISIÓN PERMANENTE

PRESIDENCIA

D.ª Ángela Abós Ballarín

VICEPRESIDENCIAS

D.ª Marta Arjol Martínez
 D. José Luis López Garcés

SECRETARIO GENERAL

D.ª Belén López Aldea

VOCALÍAS

D.ª Carmina Melendo Vera*
 D. Antonio Mostalac Carrillo
 D. Carmelo Pérez Serrano
 D. Marcos Sanso Frago
 D.ª Rosa Santos Fernández

* Nombramiento pendiente de publicación en BOA.

COMISIONES DE TRABAJO

COMISIÓN DE TRABAJO SOCIAL Y DE RELACIONES LABORALES

PRESIDENCIA: D.^a Ángela Abós Ballarín
SECRETARÍA: D.^a Carmina Melendo Vera*
VOCALÍAS: D. José M^a García López
D. Antonio Hinojal Zubiaurre
D.^a Marta Arjol Martínez
D. José Félix Sáenz Lorenzo

COMISIÓN DE TRABAJO DE ECONOMÍA

PRESIDENCIA: D. Marcos Sanso Frago
SECRETARÍA: D. Guillermo Arrizabalaga Lizarraga*
VOCALÍAS: D. Carmelo Javier Asensio Bueno
D. José María García López
D.^a Eva Pardos Martínez
D.^a Carmina Melendo Vera*

* Nombramiento pendiente de publicación en BOA.

ÚLTIMAS PUBLICACIONES DEL CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN

Informes anuales

- Informe sobre la situación económica y social de Aragón 2009.

Memoria de actividades

- Memoria de Actividades 2009.

Colección estudios

- Posibilidades y viabilidad para la reapertura del Canfranc.
- Las familias monoparentales en Aragón.

Colección Tesis Doctorales

- “Reducción de Emisiones de CO₂ en centrales térmicas de carbón pulverizado. Análisis de la integración de turbina de gas para repotenciación y ciclo de captura de CaO-CaCO₃”.
- “Estado ecológico, comunidades de macroinvertebrados y de odonatos de la red fluvial de Aragón”.

Colección Proyectos de Investigación “Ángela López Jiménez”

- Elementos clave para el desarrollo del enoturismo en Aragón desde la perspectiva de la demanda aragonesa.

Dictámenes emitidos

- Dictamen 2/2010 sobre el Proyecto de Decreto del gobierno de Aragón por el que se establecen las normas y se crea el registro para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Aragón.
- Dictamen 1/2010 sobre el Proyecto de Decreto que regula la admisión de alumnos en los centros docentes públicos y privados concertados.
- Dictamen 8/2009 sobre el Proyecto de Decreto que regula el Consejo Aragonés de Servicios Sociales.
- Dictamen 7/2009 sobre el Anteproyecto de Ley de Reforma de la Ley 1/2007, de 27 de febrero, de Actividades FERIALES Oficiales de Aragón.
- Dictamen 6/2009 sobre el Anteproyecto de Ley de Reforma de la Ley 1/1989, de 24 de febrero, de Artesanía de Aragón.
- Dictamen 5/2009 sobre el Proyecto de Decreto que modifica el Decreto 60/2009, de 14 de abril, por el que se regula el Plan aragonés para facilitar el acceso a la vivienda y fomentar la rehabilitación 2009-2012.
- Dictamen 4/2009 sobre el Proyecto de Decreto del Gobierno de Aragón por el que se regula el ejercicio del derecho a la segunda opinión médica.
- Dictamen 3/2009 sobre el Anteproyecto de Ley de Reforma de la Ley 6/2003, de 27 de febrero, del Turismo de Aragón.
- Dictamen 2/2009 sobre el Anteproyecto de Ley de Educación de Aragón.
- Dictamen 1/2009 sobre el Proyecto de Decreto regulador del Plan Aragonés para facilitar el acceso a la vivienda y fomentar la rehabilitación 2009-2012.

CONSEJO ECONÓMICO
Y SOCIAL DE ARAGÓN

Calle Costa, 18
50071 Zaragoza
Tel. 976 713 838
Fax 976 713 841
cesa@aragon.es

