

**Universidad de Zaragoza
Facultad de Ciencias
Departamento de Ciencias de la Tierra**



**CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS
ROCAS ARAGONESAS DE USOS
CONSTRUCTIVOS: PROPIEDADES HÍDRICAS Y
DURABILIDAD DE LAS ROCAS CON USO
ORNAMENTAL**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

Oscar Buj Fandos

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EUROPEO

Director: Dr. D. Josep Gisbert Aguilar

Septiembre 2008

**CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LAS ROCAS
ARAGONESAS DE USOS CONSTRUCTIVOS: PROPIEDADES
HÍDRICAS Y DURABILIDAD DE LAS ROCAS CON USO
ORNAMENTAL**

Oscar Buj Fandos

Memoria presentada en la Facultad de Ciencias de la Universidad de
Zaragoza para optar al grado de Doctor Europeo.

Zaragoza. Septiembre 2008.

Josep Gisbert Aguilar, profesor titular del Área de Petrología y Geoquímica
de la Universidad de Zaragoza

Certifica:

Que D. Oscar Buj Fandos, ha realizado bajo su dirección en el
Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza la
presente memoria y autoriza su presentación para que sea calificada como
Tesis Doctoral.

Vº Bº

Fdo.: Dr. D. Josep Gisbert Aguilar.

ÍNDICE

Agradecimientos	VII
Resumen/Abstract	IX
Summary	XI
Tabla resumen de las rocas caracterizadas	XXXVI
Lista símbolos	XXXVII
Lista tablas	XXXVIII
Lista figuras	XL

I.- INTRODUCCIÓN

I.1.- Presentación del trabajo.	3
I.2.- Introducción histórica.	5
I.3.- Introducción terminológica.	6
I.4.- Antecedentes.	7

II.- OBJETIVOS

II.1.- Caracterización tecnológica de 40 rocas de usos constructivos.	13
II.2.- Caracterización petrofísica y de la durabilidad de 18 rocas ornamentales y piedras de cantería.	13
II.3.- Desarrollo tecnológico de nuevas técnicas y/o perfeccionamiento de las existentes para la caracterización de materiales.	14

III.- METODOLOGÍA

III.1.- Introducción.	17
III.2.- Ensayos de caracterización petrológica y mineralógica.	20
III.2.1.- Microscopía petrográfica.	20
III.2.2.- Microscopía electrónica de barrido.	20
III.2.3.- Análisis digital de imágenes aplicado a la microscopía óptica y electrónica.	21
III.2.4.- Análisis químicos de elementos mayores.	23
III.2.5.- Determinación del contenido en carbonato.	23
III.2.6.- Determinación del residuo insoluble.	23
III.3.- Ensayos de caracterización física.	24
III.3.1.- Absorción, densidad aparente y porosidad abierta.	24
III.3.2.- Absorción y desorción automatizado.	24
III.3.3.- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.	26
III.3.4.- Densidad real. Método del picnómetro.	26
III.3.5.- Porosimetría de inyección de mercurio.	26
III.3.6.- Dilatación lineal por absorción de soluciones salinas y secado extremo.	27
III.3.7.- Expansión volumétrica.	28
III.3.8.- Anisotropía de susceptibilidad magnética.	29
III.3.9.- Medida de velocidad de propagación de ultrasonidos.	30
III.3.10.- Permeabilidad.	31
III.3.11.- Colorimetría.	32

III.4.- Ensayos de caracterización mecánica.	33
III.4.1.- Resistencia a la compresión uniaxial.	34
III.4.2.- Resistencia a la flexión antes y después de heladicidad.	34
III.4.3.- Resistencia al desgaste por abrasión.	35
III.4.4.- Desgaste por rozamiento en plataforma giratoria.	35
III.4.5.- Resistencia al deslizamiento sin pulimento.	35
III.4.6.- Resistencia al choque.	36
III.4.7.- Microdureza Knoop.	36
III.4.8.- Planeidad.	36
III.4.9.- Dureza superficial Shore D.	36
III.5.- Ensayos de durabilidad.	37
III.5.1.- Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.	37
IV.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA	
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.	47
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.	51
IV.2.3.1.- Canteras activas en la Cordillera Ibérica.	52
IV.3.- Fichas de situación geográfica y geológica.	55
V.- CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	
V.1.- Introducción.	85
V.2.- Fichas tecnológicas.	87
V.2.1.- Información general.	87
V.2.2.- Descripción petrográfica.	90
V.2.3.- Descripción de visu.	90
V.2.4.- Resultados de los ensayos tecnológicos.	90
V.3.- Interpretación de los resultados de los ensayos tecnológicos.	166
V.3.1.- Correlación entre características petrográficas y propiedades mecánicas en arenitas.	167
V.3.1.1.- Correlación entre porosidad y propiedades mecánicas.	167
V.3.1.2.- Correlación entre mineralogía y textura con las propiedades mecánicas.	168
V.3.2.- Correlación entre características petrográficas y propiedades mecánicas en rocas carbonatadas.	169
V.3.2.1.- Correlación entre porosidad y propiedades mecánicas.	169
V.3.2.2.- Correlación entre mineralogía y textura con las propiedades mecánicas.	170
V.3.3.- Análisis del comportamiento del material.	177
V.3.3.1.- Comportamiento hídrico.	177
V.3.3.2.- Comportamiento mecánico.	177

V.3.4.- Adecuación de uso.	180
V.3.4.1.- Estudio petrográfico.	181
V.3.4.2.- Absorción, porosidad.	182
V.3.4.3.- Resistencia a compresión uniaxial.	182
V.3.4.4.- Resistencia flexión.	183
V.3.4.5.- Heladicidad.	186
V.3.4.6.- Resistencia al choque.	187
V.3.4.7.- Resistencia al desgaste por rozamiento.	188
V.3.4.8.- Microdureza Knoop.	188
V.3.4.9.- Resistencia al deslizamiento.	189
V.3.4.10.- Resistencia al desgaste por abrasión.	190
V.4.- Conclusiones.	191

VI.- CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA DE LA ROCA FRESCA

VI.1.- Introducción.	201
VI.2.- Análisis petrológico y geoquímico de los materiales.	206
VI.2.1.- Petrografía.	206
VI.2.2.- Caracterización geoquímica.	208
VI.3.- Descripción del sistema poroso.	211
VI.3.1.- Distribución porométrica mediante porosimetría de inyección de mercurio (PIM).	211
VI.3.2.- Análisis digital de imágenes.	216
VI.4.- Análisis del comportamiento físico.	219
VI.4.1.- Estudio del comportamiento hídrico del material.	219
VI.4.1.1.- Absorción, densidad aparente y porosidad abierta.	219
VI.4.1.2.- Densidad real método del picnómetro.	221
VI.4.1.3.- Datos del sistema automatizado (absorción y desorción).	223
VI.4.1.4.- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.	233
VI.4.2.- Permeabilidad.	239
VI.4.3.- Ultrasonidos.	250
VI.5.- Conclusiones.	253
VI.5.1.- Correlación entre parámetros petrográficos y estructura porosa.	253
VI.5.2.- Correlación entre estructura porosa y propiedades físicas.	254
VI.5.3.- Conclusiones según la clasificación textural de la roca.	258

VII.- EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

VII.1.- Introducción.	265
VII.2.- Ensayos de cristalización de sales.	270
VII.2.1.- Ensayo de cristalización de sales normalizado.	270
VII.2.1.1.- Variaciones en peso y morfológicas.	270
VII.2.1.2.- Variación en las propiedades hídricas tras el ensayo de cristalización de sales.	274

VII.2.2.- Ensayo de cristalización de sales no normalizado.	277
VII.2.2.1.- Variación en la porosidad tras la cristalización de sales.	277
VII.2.2.2.- Variaciones en la permeabilidad tras la cristalización de sales.	278
VII.2.2.2.1.- Variaciones globales en la permeabilidad.	278
VII.2.2.2.2.- Variaciones en la permeabilidad en cada material pétreo.	280
VII.2.2.2.3.- Modelos globales de variación de la permeabilidad en los materiales pétreos tras cristalización de sales.	294
VII.2.2.3.- Variaciones morfológicas.	296
VII.2.2.3.1.- Expansión lineal.	297
VII.2.2.3.2.- Expansión volumétrica.	302
VII.2.2.3.3.- Anisotropía de susceptibilidad magnética.	303
VII.3.- Conclusiones.	
VII.3.1.- Ensayo de cristalización de sales normalizado.	306
VII.3.2.- Ensayo de cristalización de sales no normalizado.	306
VII.3.2.1.- Permeabilidad.	306
VII.3.2.2.- Variaciones morfológicas.	309
VIII.- EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN	
VIII.1.- Introducción.	313
VIII.2.- Tratamientos seleccionados.	315
VIII.3.- Sistemas de aplicación.	316
VIII.4.- Evaluación de la penetración de consolidantes.	318
VIII.5.- Variación de las propiedades físicas y mecánicas tras la aplicación de los consolidantes.	321
VIII.5.1.- Variación de las propiedades físicas tras la aplicación de los consolidantes.	321
VIII.5.1.1.- Absorción libre a presión atmosférica.	321
VIII.5.1.2.- Densidad aparente y densidad real.	322
VIII.5.1.3.- Absorción capilar.	322
VIII.5.1.4.- Variaciones colorimétricas.	324
VIII.5.1.5.- Absorción y desorción libre de agua mediante el ensayo automatizado.	326
VIII.5.2.- Variación en las propiedades mecánicas tras la aplicación de los consolidantes.	329
VIII.6.- Evaluación de la resistencia a la alteración.	330
VIII.6.1.- Variación en peso y estudio morfológico de la alteración.	330
VIII.6.2.- Variación de las propiedades hídricas.	334
VIII.7.- Conclusiones.	
VIII.7.1.- Evaluación de la penetración de consolidantes.	336
VIII.7.2.- Variación de las propiedades físicas y mecánicas tras la aplicación de los consolidantes.	336
VIII.7.3.- Evaluación de la resistencia a la alteración.	337
VIII.7.4.- Evaluación de la efectividad de los consolidantes.	338

IX.- CONCLUSIONES	343
--------------------------	-----

X.- BIBLIOGRAFÍA	353
-------------------------	-----

ANEXOS

Anexo 1.- Ensayos hídricos de absorción y desorción automatizados y porosimetría de inyección de mercurio.	373
---	-----

Anexo 2.- Curvas de absorción capilar antes y después de someter las probetas al ensayo de cristalización de sales.	393
--	-----

Anexo 3.- Permeabilidad.	431
---------------------------------	-----

Anexo 4.- Gráficas de pérdida en peso durante el ensayo de cristalización de sales.	465
--	-----

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.

COMO 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, una lista de símbolos y una lista con las tablas y figuras.

La tabla resumen con las principales características de las rocas caracterizadas y la lista de símbolos, además de al comienzo de la memoria, se encuentran en un cartón plastificado para su uso simultaneo a la consulta de la misma.

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 arábica 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.

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.

ABSTRACT

Technological characterization of Aragon stones used as building material: Hydric properties and durability of ornamental Rocks

This thesis focuses on the technological characterization of 40 Aragon rocks used in modern construction as construction material and extensively used on works that have left a distinctive imprint on Aragon's varied cultural and monumental heritage.

The technological characterization was carried out by specific standardized tests depending on the predominant uses of the stones (ornamental, hewn stone and flagstones). To begin with I used the correlation between physical and mechanical properties and the petrographical characteristics to establish a technological classification of building material uses of the stone in 7 groups. Recommendations for use were put in place for each of these groups. This classification was completed with the establishment of the basis for an assessment of the potential of these stones for their use in construction as well as technical quality criteria.

In the second part both, a petrophysical characterization and an evaluation of the susceptibility to salt weathering of ornamental rocks and hewn stone from the Ebro basin were carried out. These rocks present the most scientific and economic interest for Aragon.

Pore system governs the physical and mechanical behaviour of natural stone. Hence, the detailed characterization of the pore system has been done by hydric tests, mercury intrusion porosimeter, gas permeability and digital image analysis. This detailed study of the pore system has made possible the development of the automation of hydric tests and the identification of parameters of the porous system, which in turn, control the moisture movement through the rock.

An unsteady-state Portable Probe Permeameter has been used to characterize the weathering of natural building stone in the early stages of salt weathering. Global models of the behaviour of rocks have been established depending on the characteristics of the pore system.

In order to determine the durability of these stones the salt crystallization weathering test has been carried out. Finally, the effectiveness of three different consolidants has been evaluated on rocks with an important weight loss during the salt crystallization test.

I.- INTRODUCTION

The origin of this thesis is a joint project between the Aragon Government (Department of Industry, Commerce and Tourism and the Directorate of Mining and Energy) and the University of Zaragoza. This project allowed us to write the book "La Piedra Natural en Aragón" (Gisbert *et al.*, 2004) which included different technological tests in Aragon stone and gave us an excellent opportunity to study in greater depth this area. We have managed to achieve this.

Since 1990, the investigation Group, which I am a member of, has been researching the technological characterization of natural stone as a construction material and its use in both, new buildings and in the restoration of older monuments.

Aragon has numerous and substantial reserves, as well as a great variety of natural stone. This is because of the different geologic processes which have taken place throughout time in this region. Natural stone quarries are located in geological formations of Mesozoic and Tertiary age. Natural stone in Aragon is an important mining resource and an industry in growth and development.

Nowadays, there are no quarries of granite or slate in Aragon. There were small quarries of granitic rocks in the Iberian range belonging to the Permian and Triassic age. In the Pyrenees there are important outcrops of granitic rocks, however it is not possible to exploit them due to the fracturation of the rock, the altitude and the fact that these areas are part of a protected Natural Park.

In the first of two parts of this thesis a technological characterization of forty Aragon stones was undertaken, in order to evaluate the quality of these materials for building purposes. The age of these stones dates back from the Permian to Miocene ages. The criteria for selection of the forty rocks used in the present research was that they were stones from active quarries in 2004 (the quarry owners were involved in the project that culminated in the publishing of the book "Natural stone in Aragon"). This project has provided the financial support required to carry out most of the mechanical tests. Apart from these initial rocks, other stones whose quarrying began at a later date have been incorporated to the project and funding has been secured from the quarry owners to finance tests and materials.

Systematic tests were carried out in the laboratory to characterize its petrographical, physical and mechanical characteristics. After this characterization was completed, the mechanical and physical properties were studied in correlation to the petrographic characteristics with the aim of establishing technical quality criteria as well as the basis for an assessment of the potential use of these stones as building materials.

In the second part of the thesis eighteen stones have been studied (ornamental rocks and hewn stone from the Ebro basin). These rocks are of paramount scientific and economic importance, and are of particular interest for Aragon. These eighteen rocks are included in the technical characterization of the forty rocks mentioned in the first part of this thesis.

Research has been focused on the petrophysical characterization of these stones (primarily on the pore system) both before and after salt crystallization weathering tests. The petrographical characteristics and the variation in the physical test after the salt crystallization test have made possible the evaluation of the stone durability against salt crystallization tests, the movement of salt into the rock and the prediction of the behaviour of the stone during the weathering.

The petrophysical study was completed with the evaluation of the effectiveness of three consolidant treatments on stones, which presented a weight loss higher than 3% during the salt crystallization test. An important volume of our architectural heritage is built of stone; hence, the importance of the conservation and restoration studies to preserve and look after this cultural and historical heritage.

This technological characterization has been done with two objectives in mind: Firstly, to be useful as a stone characterization and a cataloguing tool of the different stones used as building material and secondly, to establish a methodology for the conservation and restoration of the Architectural heritage built with these stones.

The laboratory tests were conducted in accordance with UNE and ASTM recommendations. For those tests for which standard tests did not exist, or we had found them to be deficient, new methodologies have been developed. As part of the research and investigative work carried out for this thesis, a new technique for determining pore size distribution in stones was developed "Porosimeter measuring the intrusion of low-density fluids" International Application patent No PCT/ES2006/000681 and Priority Data 22-12-2005.

II.- OBJECTIVES

The general and specific aims of this thesis are:

II.1.- Technological characterization of forty Aragon stones used as building material.

These Stones are used in modern construction as a construction material and have been extensively used on works that have left a distinctive imprint on Aragon's varied cultural and monumental heritage.

Specific objectives

- 1- Technological characterization of Aragon stones used as building material.
- 2- To establish the basis for an assessment of the potential of these stones for their use in construction depending on their intrinsic characteristics.
- 3- To establish technical quality criteria. This is done by studying the physical and mechanical properties in correlation to the texture and composition of the stones.

II.2.- Petrophysical and durability characterization of eighteen ornamental and hewn rocks

These rocks are of paramount scientific and economic importance, and are of particular interest for Aragon. These eighteen rocks are included in the technical characterization of the forty rocks mentioned in the first part of this thesis.

In these rocks, apart from the technological characterization a further exhaustive study of their pore system was carried out, which included both, the fresh and the weathered stone after the salt crystallization test. Finally there was an evaluation of the durability of these stones.

Specific objectives:

- 1- To characterize the pore system in the fresh rock and the changes in the pore system after salt crystallization.
- 2- To study the water absorption and drying kinetics inside the stones. Interactions between water and air and changes in the kinetics of hydric test after the application of consolidants treatments.
- 3- To understand and predict the behaviour of porous rock by crystallization of salts in pores and to create a model of the movement of different salt solutions, as well as to identify the potential points of decay.
- 4- To create a model of the change in size in campanile limestone by crystallization of magnesium sulphate.
- 5- To evaluate the durability of these rocks against salt crystallization weathering test.
- 6- To research solutions for the stone decay. Evaluation of three treatment products.

II.3.- Development of technological solutions and/or improvement of previous techniques for the characterization of building materials.

- 1- Automatization of water absorption and drying test in porous materials. Thus, this technique allows a continuous measuring of the water kinetics inside the stone.
- 2- Automatization of length changes during salt crystallization.
- 3- Statistical analyses of small-scale permeability measurements have been used to evaluate the drivers for decay and hence aid the prediction of the weathering behaviour of the stones.

III.- METHODOLOGY

Our work plan developed from the need to characterize the stones used as building materials in order to obtain quality criteria, then assess the suitability of these stones for their use in construction and obtain indicators of the durability of these materials. To promote technological development is another very important aspect of this work.

The tests and analytical techniques presented in this thesis have been divided in four different groups. Table III-1 shows references for the chapters in which the results of these tests and analytical techniques have been described.

1.- Mineralogical and petrological characterization.

- 1.1.- Petrographic Microscopy. UNE-EN 12407:2001.
- 1.2.- Scanning electron microscopy.
- 1.3.- Digital image processing.
- 1.4.- Chemical analysis of major elements.
- 1.5.- Carbonate content.
- 1.6.- Insoluble residue.

2.- Physical properties.

- 2.1.- Water absorption, porosity, bulk density and real density. UNE-EN 13755:2002.
- 2.2.- Water absorption and water drying automatization test.
- 2.3.- Capillary water absorption. UNE- EN 1925:1999.
- 2.4.- Bulk density. Picnometer (method). UNE-EN 1936:2007.
- 2.5.- Pore size distribution by Mercury Intrusion Porosimetry.
- 2.6.- Linear expansion tests
- 2.7.- Volume expansion test.
- 2.8.- Anisotropy of magnetic susceptibility.
- 2.9.- Ultrasonic velocity. UNE-EN 14146:2004.
- 2.10.- Permeability.
- 2.11.- Chromatic analysis.

3.- Mechanical properties.

- 3.1.- Compressive strength. UNE-EN 1926: 1999.
- 3.2.- Flexural strength both before and after the freeze-thaw cycles. UNE-EN 12372: 1999.
- 3.3.- Abrasion resistance. UNE-EN 1341: 2002.
- 3.4.- Rubbing resistance UNE 22183:85.
- 3.5.- Sliding resistance (USRV). UNE-EN 1341: 2002.
- 3.6.- Shock strength UNE 22-189-85.
- 3.7.- Knoop hardness test. UNE 22-188-85.
- 3.8.- Flatness. UNE-EN 13373 2003.
- 3.9.- Shore D Hardness. ASTM D 2240.

4.- Durability test.

- 4.1.- Salt crystallization test. UNE-EN 12370:1999.

Table III-1: Chapters in which the results of these tests and analytical techniques have been described.

Tests and analytical techniques	Chapter V	Chapter VI-VII-VIII
Petrographic Microscopy	-----	-----
Scanning electron microscopy		-----
Digital image processing		-----
Chemical analysis of major elements		-----
Carbonate content		-----
Insoluble residue		-----
Water absorption, porosity, bulk density and real	-----	-----
Water absorption and water drying automatization test		-----
Capillary water absorption		-----
Bulk density. Picnometer (method)		-----
Mercury Intrusion Porosimetry		-----
Linear and volume expansion test.and anisotropy of magnetic		-----
Ultrasonic velocity		-----
Permeability		-----
Shore D Hardness		-----
Salt crystallization test		-----
Chromatic analysis	-----	-----
Compressive strength	-----	-----
Flexural strength	-----	-----
Abrasion resistance	-----	
Rubbing resistance	-----	
Sliding resistance (USRV)	-----	
Shock strength	-----	
Knoop hardness test	-----	
Flatness	-----	

IV.- GEOGRAPHIC AND GEOLOGICAL SETTING

A summary of the principal geological characteristics of Aragon and a description of the geological units is presented in chapter IV. This summary has been used as a framework for the localization of the different geologic formations and quarries in which the 40 stone varieties are exploited. Table IV-1 includes the following information for all forty stones: geological unit, abbreviation, age, geologic formation and the varieties exploited in each quarry. Table IV-2 includes the following information for all forty stones: scientific name, commercial name and geographic setting.

The autonomous community of Aragon has a surface area of 47,669 Km² and is located in north-eastern Spain (Figure IV-1). Aragon is bordered by France to the north, Castellón, Lérida and Tarragona to the east, Valencia and Cuenca to the south, and Navarra, La Rioja, Soria, Guadalajara and Cuenca to the west.

From a geological point of view Aragon can be divided into three zones: the Pyrenees, the Ebro basin and the Iberian range, (Figure IV-2) although these zones in fact spread beyond the autonomous community of Aragón.



Figure IV-1: Geographical location of the different quarries.

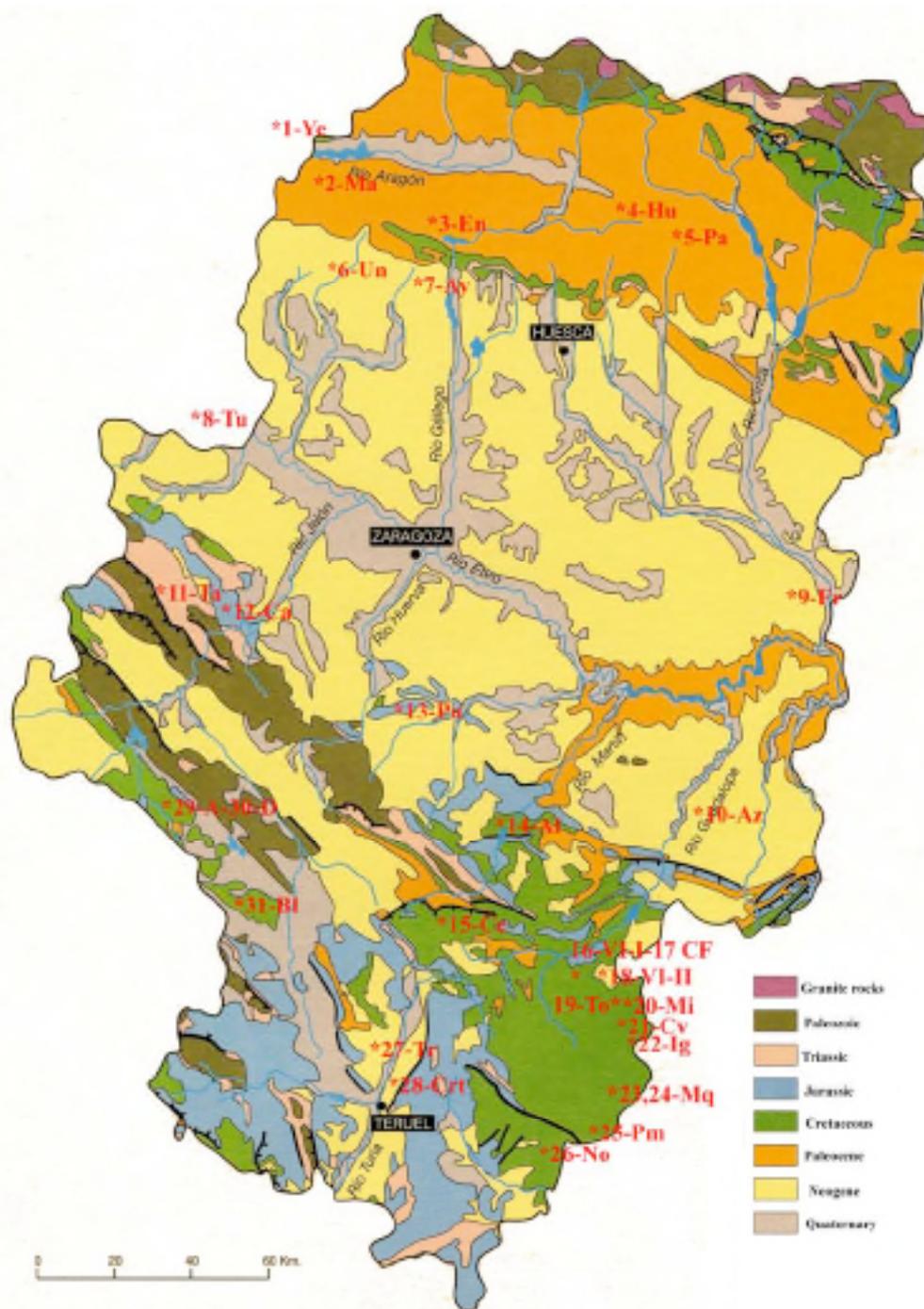


Figure IV-2: Geological map of Aragón with the location of the different quarries. (Modified from Peña Monné, 1995).

Table IV-1: Geological settings of the characterized stones.

Geological unit		Abbreviation;	Age	Formation	Varieties	
Pyrenees	1- Ye		Eocene (Priabonian)	Fm. Margas de Pamplona	1	
	2- Ma		Eocene (Bartonian)	Fm. Belsué-Atares	1	
	3- En		Eocene (Lutetian)	Fm. Campodarbe	1	
	4- Hu		Eocene (Cuisinian - Lutetian)	Grupo Hecho	1	
	5- Pa		Eocene (Cuisinian-Lutetian)	Grupo Hecho	1	
Ebro basin	6- Un		Miocene (Aquitanian-Burdigalian)	Fm. Uncastillo	1	
	7- Ay		Miocene (Aquitanian-Burdigalian)	Fm. Uncastillo	1	
	8- Tu		Miocene (Aquitanian)	Fm. Tudela	1	
	9- Fr		Miocene (Aquitanian-Turolian)	Torrente Cinca-Alcolea del Pinar	1	
	10- Az		Miocene (Aquitanian)	Fm. Caspe	1	
Iberian Ranges	Aragonese branch	11- Ta	Lower Triassic	Facies Buntsandstein	1	
		12- Ca	Middle Jurassic (Bathonian)	Fm. Chelva	3	
		13- Pu	Upper Jurassic (Tithonian)	Fm. Higuieruelas	1	
		14- Al	Lower Cretaceous (Barremian-Aptian)	Fm. Alacón	1	
		15- Ce	Cretaceous (Albian-Cenomanian)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1	
		16- VI-I	Upper Cretaceous (Cenomanian)	Fm. Órganos de Montoro	1	
		17- CF	Upper Cretaceous (Cenomanian)	Fm. Órganos de Montoro	2	
		18- VI-II	Miocene		1	
		19- To	Cretaceous (Albian-Cenomanian)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1	
		20- MI	Lower Cretaceous (Aptian)	Fm. Calizas y margas de Chert	1	
		21- Cv	Lower Cretaceous (Albian)	Fm. Calizas Ocreas de Benasal	1	
		22- Ig	Lower Cretaceous (Albian)	Fm. Calizas Ocreas de Benasal	1	
		23-Mq-1	Cretaceous (Albiense-Cenomanian)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1	
		24-Mq-2	Cretaceous (Albian-Cenomanian)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	4	
	25- Pm	Cretaceous (Albian-Cenomanian)	Fm. Calizas y margas Mosqueruela	1		
	26- No	Lower Cretaceous (Albian)	Fm. Calizas Ocreas de Benasal	1		
	Calatayud Daroca Teruel depression	27- Tr		Miocene		1
		28- Crt		Miocene (Turolian)	Calizas y margas Turolienses	1
	Castillan branch	29- A		Upper Cretaceous (Turonian-Coniacian)	Fm. Embalse de la Tranquera	1
		30- D		Upper Cretaceous (Turonian-Coniacian)	Fm. Embalse de la Tranquera	1
		31- Bl		Upper Cretaceous (Turonian-Coniacian)	Fm. Barranco de los degollados	3

Table IV.-2: Classification of the characterized stones.

Abbreviation	Scientific name	Commercial name	Geographic setting
Detritic Rocks.			
1-Ye	Litharenitic - Sedarenite	Piedra de Yesa	Yesa
2-Ma	Litharenitic - Sedarenite	Piedra de Martes	Martes
3-En	Litharenitic - Sedarenite	Piedra de Ena	Ena
4-Hu	Litharenitic - Sedarenite	Piedra Alto-Aragón	Fiscal
5-Pa	Litharenitic - Phylloarenite	Piedra de Pueyo	Pueyo Araguás
6-Un	Calclithite	Piedra de Uncastillo	Uncastillo
7-Ay	Calclithite	Piedra de Ayerbe	Ayerbe
10-Az	Calclithite	Piedra de Alcañiz	Alcañiz
11-Ta	Lithic Grauwacke	Laja de Tabuena	Tabuena
Carbonated Rocks.			
8-Tu	Biomicrite bioclastic Wackstone	Piedra Campanil	Cabanillas
9-Fr	Biomicrite bioclastic Wackstone	Piedra Campanil	Fraga
12-Ca1	Biopelmicrite- bioclastic and pelitic Packstone	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
Ca2	Biopelmicrite- pelitic and bioclastic Packstone	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
Ca3	Biopelmicrite- pelitic and bioclastic Packstone	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
13-Pu	Biopelmicrite- pelitic and bioclastic Wackstone	Amarillo Puebla	Puebla de Albortón
14-Al	Biomicrite- bioclastic Wackstone	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	Travertine-Sparstone	Travertino Nogal Montoro	Villarluengo
19-To	Bioesparite-bioclastic Grainstone	Piedra caliza Villosos	Villarluengo
20-MI	Bioesparite-bioclastic Grainstone	Losa Ocre	Mirambel
21-Cv1	Bioesparite-bioclastic Grainstone	Laja Verde	Cantavieja
Cv2	Bioesparite-bioclastic Grainstone	Paja	Cantavieja
22-Ig	Bioesparite-bioclastic Grainstone	Amarilla Cortes, Laja Oro, Laja Plata	Iglesuela
23-Mq-1	Biomicrite- bioclastic Packstone	Fósil Blanca, Fósil Amarilla, Gris Raíces	Mosqueruela
24Mq-21	Pelmicrite- bioclastic and pelitic Wackstone	Ciega Blanca	Mosqueruela
Mq-22	Biomicrite- bioclastic and pelitic Wackstone	Ciega Gris	Mosqueruela
Mq-23	Biopelmicrite- bioclastic and pelitic Wackstone	Gris Verde Monte	Mosqueruela
Mq-24	Biopelmicrite- bioclastic and pelitic Wackstone	Blanca Paja	Mosqueruela
25- Pm	Biomicrite- bioclastic Wackstone	Losa Blanca, Fósil Blanca	Puertomingalvo
26- No	Intraesparite- intraclastic Grainstone	Losa Amarilla y Roja	Nogueruelas
27- Tr	Travertine-sparstone	Travertino Teruel	Villalba baja
28- Crt	Biomicrite- bioclastic Wackstone	Crema Teruel	Tortajada
29- A	Biopelmicrite- bioclastic and pelitic Wackstone	Abanto Primera	Abanto
30 -D	Sparstone	Abanto Comercial	Abanto
31- B11	Dolosparstone	Blancas Crema	Blancas
B12	Dolosparstone	Blancas Jaspe	Blancas
B13	Dolosparstone	Blancas Moka	Blancas

A categorisation system was set up with index cards for geographical and geological settings of the stones characterized. One index card was used for each geologic formation. Each of these index cards has three main headings: General information, Geographic setting and Geologic setting and characteristics of the quarries.

a) General information

This section includes the abbreviation of every stone, scientific name, geologic formation and geological age.

b) Geographic setting

This section indicates the place in which quarries are located, the number of the 1:50.000 geological map, its geographical coordinate and the company that exploits the material.

c) Geologic setting and characteristics of the quarries.

This section includes both, the characteristics of the geologic formation and the characteristics of the quarrying methods. This section is completed with pictures of the quarries.

Uncastillo formation index card is included.

Abbreviation: 6-Un

Scientific name: Calcilithite

Age: Miocene (Aquitanian - Burdigalian) **Formation:** Uncastillo

The "Piedra de Uncastillo" (6-Un) is extracted from the "Martinez quarry". This quarry is located in Uncastillo (Zaragoza), in the southwest of the geological map of Uncastillo (208) 1:50.000.

Geographical coordinate:

Longitude West 1° 09'10".

Latitude North 42° 21'04"

X 657.326 Y 4579.521 Z 760

Company: Olnasa, S.L.

Geologic setting and characteristic of the quarries

Uncastillo sandstone is located in the Uncastillo geological formation (Puigdefábregas, 1975) which dates from the Miocene age (Aquitanian - Burdigalian). It is located in the north of the Ebro basin in contact with the external sierras. This formation is composed of alternance layers of siltstone and sandstone with a geometry of braided deposits and an unusual disposition of layers. These deposits have been formed by fluvial and alluvial fans from the external sierras.

Uncastillo geological formation has been divided into three tecto-sedimentary units U1, U2 and U3 (Arenas, 1993) that were controlled by the uplift of sediment source areas of the Gavarnie Unit. The boundaries between these units are sedimentary breaks. The quarry is located in the unit U2.

The types of stones which can be distinguished in the outcrops are conditioned by both the sedimentary facies and the degree of alteration. Uncastillo sandstone presents a lithological variety controlled by the thickness of the deposit (1.2-3m) and its distinct alteration.

Uncastillo sandstone is extracted in the "Martinez quarry" from lenticular, slightly slanted strata up to 3 metres thick and about 50-90 meters in length. This sandstone has a variable grain size, the medium-grain being the most commonly used. The main discontinuities in Uncastillo sandstone are joints with a separation from 1.5 to 3 metres, and clay levels of fluvial origin. Blocks are extracted from the outcrops of the quarries with a size of 2.5x1.7x1.8 meters.



A



A'

Figure A - General view of the sandstone quarry.

Figure A' - Block extraction of Uncastillo sandstone with a jack-hammer.

V.- TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION

This chapter presents the results of technological tests of different Aragon building stones. The technological characterization was carried out by specific standardized tests depending on the predominant uses of these stones.

The quality of stone to be used as building material depends on its intrinsic characteristics, environmental conditions and its position in the building or monument. Therefore, a technological characterization of the stone to assess its suitability for use as a building material is of paramount importance.

The results of the technological characterization of these stone are outlined in technological index cards for each of the stones. These technological index cards include four sections: general information, petrographic description, megascopic description of hand specimens of rocks and technological results of the tests. (Uncastillo sandstone (6-Un) index cards are included).

Variation in the physical properties of rocks is an important factor to establish selection criteria for their use as building material. The interpretation of data from technological characterization tests has allowed us to establish a correlation between the physical properties and the petrographic characteristics with mechanical properties. It has also allowed us to evaluate the behaviour of the stones, assess their durability and criteria for use and to undertake a technological classification.

In order to determine the influence of open porosity (open porosity, bulk density and water content are parameters dependent on each other) in the different mechanical properties of the stone, and to evaluate their textural and mineralogical properties which may show differences in their mechanical behaviour, a statistical analysis has been carried out.

This study has been completed with statistical simple regression analysis between the compressive and flexural strength and the petrographic characteristics in sandstone and multiple regression analysis between the compressive and flexural strength and the petrographic characteristics in carbonated rocks.

Abbreviation: 6-Un

Scientific name: Calcilithite

Commercial name: Piedra de Uncastillo

Use of the stone : Hewn stone

Petrographic description:

The Piedra de Uncastillo is classified as a lithic arenite following the classification of Pettijohn (1973). The skeleton is grain-supported 69% with heterogeneous fragments of rocks 82.3%, (fragments of carbonated (calcite and dolomite - micrite, mono and polycrystalline) medium size of 0.3 mm (62%), fragments of metamorphic and volcanic rocks medium size of 0.25 mm (38%), quartz 14% (mono- and polycrystalline) medium size of 0.25 mm, and feldspar 3% medium size of 0.18 mm. Its accessory minerals are zircons, sphene, tourmalines, pyroxene, iron oxides and muscovite.

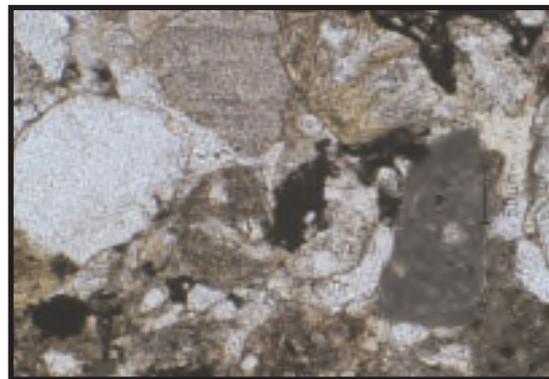
Cement 19% medium size of 0.16 mm is constituted by sparite and microsparite carbonate (calcite and dolomite) (90-95%) and silica (5-10%). Carbonated sparry cement is occasionally of ferric calcite. The grains contact are mainly curved, the interstitial spaces are occupied by phyllosilicate matrix 2% and the open porosity is 10 %.

The grain size, shape and sorting of these rocks are homogeneous, with subround-subangular grains with an average size of 0.2-0.35 mm and maximum of 0.7-0.9 mm, and sorting values more or less constant between 1.2-1.4.

Parallel-polars

A

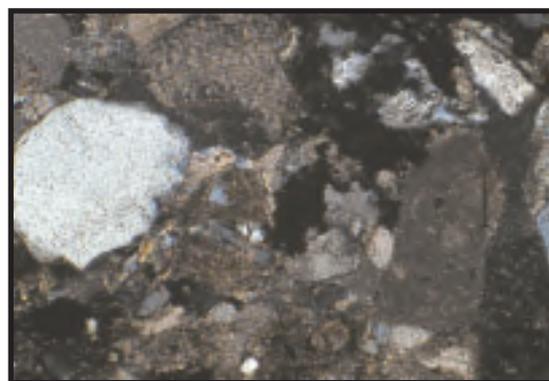
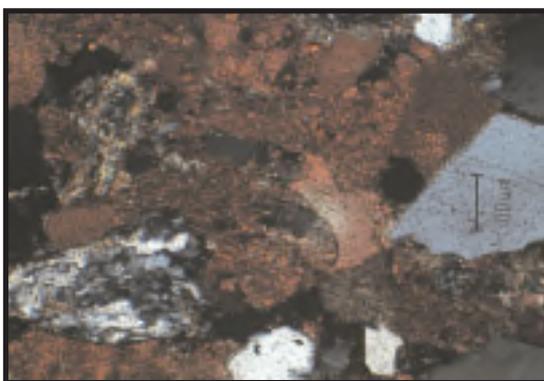
B



Crossed-polars

A'

B'



A-A' (x10) General view of the stained area. Quartz, carbonated and metamorphic fragments cemented together by sparitic calcite (bar length 100 μm).

B-B' (x20) Quartz and lithic fragments (carbonated and (Metamorphic) with grain size variable cemented together by sparitic calcite (bar length 50 μm).

Abbreviation: 6-Un

Megascope description of hand specimens:

Macroscopically is a laminated sandstone with a greyish-orange (Munsell: 10YR 5/4) colour and medium-grain. This sandstone has a high porosity. It is high porosity sandstone, with average pore size of 2-4 mm and without important discontinuities.

Technological results of the tests		Deviation standard	Coef. Variation	Anisotropy
Absorption	4.61%	0.608%	0.13	
Bulk density	2272kg/m ³	44.45kg/m ³	0.02	
Real density	2531kg/m ³	16.71kg/m ³	0.007	
Open porosity	10.43%	1.182%	0.11	
Sliding resistance	71	1.58	0.02	
Compressive strength				
 A	A 43.33Mpa	11.40Mpa	0.08	1.00
 B	B 43.29Mpa	30.12Mpa	0.22	
Flexural strength				
 A	A 3.24Mpa	0.46Mpa	0.14	0.07
	B 3.10Mpa	0.26Mpa	0.08	
	C 3.01Mpa	0.19Mpa	0.06	
 B	Afer freeze thaw A 3.88Mpa	1.96Mpa	0.50	0.38
	Afer freeze thaw B 3.41Mpa	0.36Mpa	0.11	
	Afer freeze thaw C 4.97Mpa	0.27Mpa	0.05	
Abrasion resistance				
A- bedding perpendicular	31.5mm	4.22mm	0.13	1.40
B- bedding parallel	22.5mm	8.51mm	0.37	
Chromatic analysis		L* 60.4 a* 3.4 b* 16.2		

Analysis of variance

	Nul hypothesis	Behaviour
Compressive strength	0.99	Isotropy
Flexural strength	0.39	Isotropy
Flexural strength afer freeze thaw	0.09	Isotropy
Abrasion resistance	0.05	Isotropy

VI.- PETROPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE FRESH ROCK

Petrophysical studies have made possible the interpretation of physical properties in terms of rocks components and petrographic characteristics (mineralogy, porosity, texture, open fissures, grain interlocking, rock anisotropy, minerals, chemical composition, etc.) (Montoto, 1983).

The durability of a rock depends on porosity and pore size distribution. Therefore it is necessary to carry out a systematic characterization of the pore system of a stone in order to assess its durability (Sebastián Pardo & Zezza, 1995).

The pore system has been characterized by direct and indirect techniques:

The direct techniques are those that allow us to observe the pore system directly. The techniques used in this group were optical petrographic microscopy and scanning electron microscopy with the application of digital image analysis.

The indirect techniques are those that do not allow us to observe directly the pore system. Thus, we can obtain information about the pore system by measuring the physical properties of a particular fluid (whether liquid or gas). This technique yields different coefficients. In this group the techniques used were hydric test, permeability measuring and mercury intrusion porosimeter.

Mercury intrusion porosimeter and digital image analysis have made it possible to quantify the pore size and shape and the pore-throat size and shape. The automatization of hydric test, the capillary absorption test and permeability test have allowed us to characterize the movement of fluids through rock.

VII.- EVALUATION OF THE SUSCEPTIBILITY TO SALT WEATHERING

The petrophysical characterization of these materials has been completed with the evaluation of the susceptibility to salt weathering. In order to quantify stone durability, a salt crystallization test has been used. Crystallization is one of mechanisms whereby salts may stress rocks and causes weathering breakdown. This ageing test has been chosen because salt crystallization is the most aggressive decay mechanism in Aragon. This decay mechanism affects both, stone used in new buildings and stone belonging to Architectural Heritage buildings.

Experimental studies have shown that porosity and pore size distribution influence rock susceptibility to weathering (Mc Greevy, 1996; Ordoñez *et al.*, 1997). In addition to the pore system, tensile strength also plays an important role in durability against salt crystallization (Ruedrich *et al.*, 2005).

Crystallization of soluble salts within the pores of the stone is widely recognised as a major mechanism causing the deterioration of monuments and architectural heritage (Correns, 1949; Wely, 1959; Evans, 1970; Franzini, 1995; Price, 1996; Benavente *et al.*, 1999; Rodríguez Navarro & Dohene, 1999; Scherer, 1999; Flat, 2002).

The changes generated in the pore system during the weathering create an increase in the speed of the weathering process. This increase in the speed of weathering is not linear but exponential, Winkler (1975). Petrophysical parameters such as porosity (McGreevy 1996; Nicholson 2001; Bidner *et al.*, 2002; Prikryl and Dudková 2002; Jornet *et al.*, 2002; Pera and Burlini 2002) and permeability (Carey and Curran 2000; Russell *et al.*, 2002; Warke *et al.*, 2006; McKinley *et al.*, 2006; McKinley and Warke 2007) are the key properties to evaluate the susceptibility of stone to weathering in laboratory simulations.

In this chapter an evaluation of the variation in the physical properties (water absorption, permeability and capillary water absorption) after the salt crystallization weathering test is undertaken. These properties are the key to assess the prediction of the stone durability and the patterns of the process of stone decay. The changes in the pore system that take place during the salt crystallization are: changes in the connectivity of the pore system, partial sealing of stone surfaces and creation of new cracks and /or the extension of pre-existing micro-cracks and pores.

However, the results of each test only show the behaviour of the stone against a single agent. Hence, it is necessary to interpret the significance of these results as a whole in order to find relationships which reflect reality.

Sodium sulphate, magnesium sulphate and sodium chlorite salt solutions were selected to investigate the durability of these stones. Sodium sulphate was selected in accordance with UNE-UNE 12370:1999 recommendations and magnesium sulphate and sodium chlorite were selected on the basis of their frequent presence in the historical buildings in Aragon. These three salt solutions belong to the group of the five more aggressive salts reported by Goudi in 1993. Goudi established the following ranking of aggressiveness in salts; ordered from highest to lowest in terms of aggressiveness: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - NaCl - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

The standard salt weathering test was performed under laboratory conditions in accordance with UNE-EN 12370 recommendations. In order to evaluate and assess the changes after the salt weathering test, variation in weight was used throughout the test and samples were checked for loss of weight, changes in physical damage and changes in the hydric test.

In addition to the standard test, the durability of these stones was evaluated by assessing the changes in porosity and permeability after 5 cycles of salt crystallization of magnesium sulphate and sodium chlorite solutions at two different concentrations: 5% and 15%. The weathering cycles entailed the total immersion of separate blocks in different solutions for 8 hours, followed by drying for 20 days at $22^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ and with relative humidity values of $25\% \pm 5\%$.

Finally, the evaluation of salt crystallization process was completed with the morphological changes that take place in two varieties of campanile limestone from the Ebro Basin: 8-Tudela and 9-Fr Fraga.

In previous work done by the research group Arbotante in the Cathedral of Tudela we found a very severe and rapid decay form in the Tudela Campanile limestone 8-Tu, characterized by swelling during the extreme drying in the presence of a magnesium sulphate solution. This form of decay presents a morphology similar to a mechanical fracture with breakages of convex surfaces and sharp edges. From a geological point of view, Fraga Campanile limestone 9-Fr is a limestone with the same age and with the same microfacies than the Tudela limestone.

In this thesis, it is presented the qualitative and quantitative characterization of swelling in the Tudela limestone. In addition, we endeavour to determine if there is swelling in the Fraga limestone, as this is an important handicap for the use of these rocks as building materials.

VIII.- EVALUATION OF CONSOLIDANTS TREATMENT

In this chapter, it has been evaluated the effectiveness of three consolidants on stone in order to evaluate their effectiveness against salt crystallization. These products have been evaluated on stones with a weight loss greater than 3% during the salt crystallization test in fresh rock. The stones characterized have been the carbonated rock Blancas 31-B12 and three sandstones belonging to the Miocene age; Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) and Alcañiz (10-Az).

Of the wide range of consolidants available, only three were selected on the basis of their reported beneficial effects on stones, petrographic characteristics of the stones, decay agents and their use in the fields of stone conservation and industrial rocks.

The conservation products used were Bersil (lithium-silicate), Betolin (potassium-silicate) and Paraloid B-72 (metacrylate and ethylmetacrylate copolymer). The first two are inorganic consolidants (both alkaline) and the third is an organic consolidant.

These products were tested on 5 cubic centimetre stone samples using two different application methods: total immersion at room pressure and temperature and brushing (all four lateral surfaces were coated with the consolidants, pursuant to RILEM recommendations and the operation was repeated three times with an interval of one hour between each application).

Scanning electron microscopy (SEM) has been used to determine the depth of penetration and distribution in the pore system of the stone. The samples used were 1x1x2 centimetre stone samples.

In order to evaluate the effectiveness of the different consolidant treatments and the durability of the samples, mechanical and physical properties tests were carried out both, before and after treatment with the consolidants.

The properties measured both before and after treatment with the consolidants were: water absorption, capillary water absorption, drying, Shore- D surface hardness, bulk density, colour, real density and porosity. Water absorption and water drying were evaluated dynamically by the automatization of the hydric test.

In order to determine the durability of these stones and the effectiveness of consolidants treatment, the salt crystallization weathering test has been carried out in accordance with UNE-EN 12370 recommendations. The evaluation of changes in the stone after the salt crystallization weathering test, was carried out through estimations of weight loss in the samples, visual appraisal for physical damage and changes in the hydric test.

IX.- CONCLUSIONS

The aim of this study is to provide a technological characterization and to assess durability and susceptibility to weathering of natural stone.

Objective 1. - Technological characterization of forty Aragon stones used as building material.

Objective 2. - Petrophysical and durability characterization of eighteen ornamental and hewn rocks.

Objective 3. - Development of technological solutions and/or improvement of the application of previous techniques for the characterization of building materials.

Technological characterization of forty Aragon stones used as building material.

-The forty sedimentary rocks characterized in this thesis are of great importance, both for their use as building material and because they have been widely used as building material for centuries in many Spanish historical monuments.

-Standardized tests of technological characterization are an essential tool to obtain objective criteria for the assessment of the suitability of stone for its use as building material and for the prediction of its behaviour during its lifespan. The selection of building materials must be done according to their intrinsic characteristics, environmental conditions and their position in the building or monument.

-A technological classification was established which comprised 7 groups of stone materials. This was done by creating a correlation between the physical and mechanical properties and the petrographical characteristics. These groups are:

1- Sandstones with porosity of less than 5% (Yesa (1-Ye), Martes (2-Ma), Ena (3-En), Fiscal (4- Hu), Pueyo de Araguás (5-Pa) and Tabuena (11-Ta)). These stones satisfy the most restrictive values for the compressive and flexural strength test. These rocks are suitable for use as paving slabs, both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistance) and can be used in areas subject to heavy pedestrian and light or heavy vehicle traffic. They are also suitable for use in stonework and facing because of its high mechanical strength and its low porosity.

2- Sandstones with porosity of more than 5% (Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az)) have a high industrial value due to their properties as building stone, because of their medium values of mechanical strength. This strength is enough to take on vertical mechanical strength requirements and allow an easy extraction in the quarry and an easy processing. Depending on the relation between calcite/quartz and calcite/dolomite these rocks are also suitable for use as paving slabs. These rocks are freeze-thaw resistant and can be used in both indoor and outdoor.

3- Biomicrites-Pelmicrites with porosity less than 3%. These stones satisfy the most restrictive values for the compressive and flexural strength test. These rocks are suitable for use both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistant) except Mosqueruela (24-Mq23).

A) Biomicrites with predominant uses as ornamental rocks (Calatorao (12-Ca1-2-3), Puebla de Albortón (13-Pu), Tortajada (28-Crt) y Abanto (29-A)). These rocks are suitable for use as stonework, covering and paving slabs both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistant) and can be used in areas subject to heavy pedestrian and light or heavy vehicle traffic. These materials can be polished, after which they have a high added value for decorative purposes.

B) Biomicrites with predominant uses as hewn stone and flagstones (Alacón (14-Al), Mosqueruela (23-Mq1, 24-Mq21-22-23-24) and Puertomingalvo (25-Pm)) are suitable for use as stonework and paving slabs (The intended use of these stones as paving slabs depends on the abrasion resistance as well as on the sliding resistance).

4- Biomicrites with porosity of more than 10%. (Tudela (8-Tu) and Fraga (9-Fr)) like the sandstone with porosity of more than 5% have a high industrial value due to their properties as building stone because of their medium values of mechanical strength. These rocks are suitable for use as stonework and paving slabs, both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistant) and can be used in areas subject to heavy pedestrian and light vehicle traffic.

5- Recrystallized carbonated rocks (Cuevas (15-Ce), Villarlengo (16-VI-I, 17-CF, 18-VI-II), Villalva (27-Tr), Abanto (30-D) and Blancas (31-BI)) present important variations in their mechanical behaviour depending on their composition. Dolomite rocks satisfy the most restrictive values for the compressive and flexural strength test. However calcite rocks present medium-low values for compressive and flexural strength. These rocks are suitable for use as stonework and facing and can be polished, after which they have high added value for decorative purposes.

Dolomites recrystallized rocks are suitable for use as paving slabs, both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistant) and can be used in areas subject to heavy pedestrian and light or heavy vehicle traffic. Calcite recrystallized rocks are suitable for use as paving slabs in areas subject to light vehicle traffic and indoor areas with moderate pedestrian use.

6- Biosparites with porosity of less than 3% (Iglesuela (22-Ig), Noguerauelas (26-No) and Cantavieja (21-Cv)) are only commercialized as flagstones because of their quarrying method. With flagstone only the superficial upper 2 m with a moderate level of meteorization are quarried. These rocks satisfy the most restrictive values for the compressive and flexural strength test. These rocks are suitable for use as stonework, facing and paving slabs both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistant) and can be used in areas subject to heavy pedestrian use.

7- Biosparites with porosity of more than 3% (Villarluengo (19-To) y Mirambel (20-Mi)) are only commercialized as flagstones. These rocks present medium-low values for compressive and flexural strength. These rocks are suitable for use as stonework, covering and paving slabs, both indoor and outdoor (these rocks are freeze-thaw resistant) and can be used in dry or damp areas subject to heavy pedestrian use with paved ramps and slopes. These materials can also be polished.

-Technical quality criteria was established by creating a correlation between the physical and mechanical properties and the petrographic characteristics.

-In the sandstones it has been found significant statistical correlations between porosity and mechanical properties. There is an inverse linear relation between porosity and compressive strength, flexural strength and abrasion resistance. There is also a direct linear relation between porosity and sliding resistance.

-Eocene sandstones with porosity of less than 3% from the Pyrenees have high mechanical strength values. Variations in these high values depend on the petrographic characteristics. The mechanical strength in these rocks increases when the percentage of cement rises and when both, the porosity and the percentage of lithic fragments diminish.

-In carbonated rocks the mechanical behaviour depends on the textural characteristics. A model has been developed to predict the compression and flexural strength in carbonated rocks and a statistically significant correlation ($R= 0.86$) has been found. The petrographic parameters which influence the compression strength in carbonated rocks include porosity and cement content. The petrographic parameters which influence the flexural strength include porosity, matrix content and cement content.

-In detritic rocks and carbonated rocks (except for recrystallized rocks) the abrasion resistance depends on its mineralogical composition. For rocks classified in the same technological group, the abrasion resistance is higher in those rocks that have lower values for relations between calcite and quartz and calcite and dolomite.

-A variance analysis (ANOVA) has been carried out to assess possible anisotropy in the behaviour of the material. The presence of anisotropy in the physical and mechanical properties controls the patterns of weathering in the building materials. Ayerbe (7-Ay) sandstone present anisotropic behaviour with regards to the compression strength test. Hence, this anisotropic structure can restrict the use of this stone as building material.

Petrophysical and durability characterization of eighteen ornamental and hewn rocks.

-In this part of the thesis eighteen stones have been studied (ornamental rocks and hewn stone from the Ebro basin). These rocks present both, the most scientific and economic interest for Aragon.

-A detailed description of the pore system has been carried out for each technological group with the results obtained from the petrographical study, the mercury intrusion porosimetry and the hydric test.

-The pore structure of the rock depends on the sizes and shapes of the different minerals found in the sedimentary rocks. In general, the bigger the grains, the larger the pores and throat.

-Micritic calcite crystals induce the formation of microspores in the micritic limestones. However, dolomitic crystals, microsparite calcite and dolomitic crystals, as well as calcitic and dolomitic cement induce the formation of pores bigger than those caused by micritic calcite crystals (figure VI-24) in recrystallized carbonated rocks. Changes in the percentage of cement create evident changes in the pore system.

1- Sandstones with porosity of more than 5% (Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) and Alcañiz (10-Az). Alcañiz (10-Az) present high water absorption and capillary water imbibition, which indicates that the pore connectivity is high. Hydric test in 6-Un and 7-Ay indicate a reduced pore connectivity than 10-Az, with a low desorption rate. 6-Un and 7-Ay sandstones have both the same percentage of macroporosity and the same average pore entrance size. However, 10 AZ sandstone has a greater percentage of macroporosity and a greater average pore entrance size. These stones present more than 45 % of their pore entrances in the pore class $>1 \mu\text{m}$.

2- Biomicrites-Pelmicrites with porosity lower than 3% (Calatorao (12-Ca1-2-3), Puebla de Albortón (13-Pu), Tortajada (28-Crt) and Abanto (29-A)), present a low connectivity and a tortuous pore system. These stones present a low water absorption, desorption and capillary water inhibition. These stones have the lowest values for the saturation coefficient and the highest values for critical water content. These stones present more than 86 % of their pore entrances in the pore class $<0.1 \mu\text{m}$ and present the lowest values for the average pore entrance size.

3- Biomicrites with porosity more than 10 % (Tudela (8-Tu) and Fraga (9-Fr)) present a homogeneous pore system with high pore connectivity. The water absorption and water desorption is very fast and present a low critical water content. This critical water content indicates a high desorption rate. These stones present more than 65 % of their pore entrances in the pore class $0.1-1 \mu\text{m}$.

4- Recrystallized carbonated rocks (Cuevas (15-Ce), Villarluengo (16-VI-I, 17-CF, 18-VI-II), Villalva (27-Tr), Abanto (30-D) and Blancas (31-BI)), present a pore system with high pore connectivity. This high pore connectivity permits very efficient desorption of water from porous and hence a low critical water content. Villarluengo (17-CFI), Abanto (30-D) and Blancas (31-BI1, 31-BI2), present more than 65 % of their pore entrances in the pore class 0.1-1 μm and Villarluengo (16-VI-I) and Blancas (31-BI3) present more than 45 % of their pore entrances in the pore class $>1 \mu\text{m}$.

-The movement of fluids through the rock before and after treatment with consolidants has been correlated to the petrographic characteristics (texture and mineralogy) and to the characteristics of the pore system.

-The correlation between the hydric properties and the characteristics of the pore system indicate that water absorption, capillary water absorption and water desorption depend on average pore entrance size and on the percentage of pore class $<0.1 \mu\text{m}$.

-Water saturation and capillary water absorption are controlled by average pore entrance size. The bigger the average pore entrance size the bigger the water saturation and capillary water absorption.

-Water desorption rates presents a high correlation with pore entrance size $<0.1 \mu\text{m}$. This correlation is better than with average pore entrance size. The bigger the percentage of pores <0.1 , the bigger the critical water content and the retention of water.

-The continuous absorption/time and the continuous drying/time graphs were elaborated. The graphs show the changes that take place in the porous system when the consolidant treatment was applied in (Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) and Alcañiz (10-Az)). After the treatment of these rocks with potassium silicate and lithium silicate there was an acceleration of the water uptake during the early stages. This acceleration is the result of the homogenization of the pore system by the partial precipitation of the products in the biggest pores. The result of this precipitation is a homogeneous pore system with a lower average pore size.

-Susceptibility to weathering of natural building stone has been characterized using an unsteady-state Portable Probe Permeameter. This is the best technique to evaluate the potential decay during the early stages of weathering. Permeability is an effective method of monitoring the modification of the hydraulic properties of stone by weathering processes and allows the prediction of the weathering behaviour of the stones.

-Variations between the permeability properties on fresh rock and the same rocks after the early stages of salt weathering simulation were used to identify the variations in movements of fluids, the potential points of decay as well as for the prediction of the weathering behaviour of stone.

-The textural and structural characteristics which are the potential points of decay are: bioturbation (Fraga (9-Fr), Puebla de Albornón (13-Pu) and Blancas (31-B11 and 31-B12)), grain size micritic recrystallization (Fraga (9-Fr), Puebla de Albornón (13-Pu), Villarluego (16-VI-I), Tortajada (28-Crt) and Blancas (31-B13)), discontinuities as stylolites (Abanto (29-A)), clear preferred orientation of bioclastic components (Tudela (8-Tu)) and sparitic areas (Blancas (31-B12) and Tortajada (28-Crt)). In test samples these elements will be more weathering depending on its position. The nature of the drying regime is also crucial, in this case, a prolonged, slow drying.

-Global modelling of stone behaviour in the early stages of a salt weathering was carried out. It was possible to identify a relationship between permeability variations and pore system characteristics.

-Stones with more than 85 % of their pore entrances in the pore class $<0.1 \mu\text{m}$ (Calatorao (12-Ca1-2-3), Puebla de Albornón (13-Pu) and Tortajada (28-Crt)) present a decrease in the permeability values after salt crystallization. These stones are not weathering in the early stages of salt crystallization and the dominant process is passive pore filling. However, rocks with discontinuities as stylolites and with more than 85 % of their pore entrances in the pore class $<0.1 \mu\text{m}$ (Abanto (29-A)) present an increase in the permeability values after salt crystallization. The dominant processes are salt crystallization and the creation of new cracks and/or the extension of pre-existing micro-cracks and pores.

-Stones with more than 85 % of their pore entrances in the pore class $>0.1 \mu\text{m}$ (biomicrite with porosity more than 10% and recrystallized carbonated rocks) present an increase in the permeability values after salt crystallization. These stones are weathering in the early stages of salt crystallization. The dominant processes are salt crystallization and creation of new cracks and/or the extension of pre-existing micro-cracks and pores.

-Tudela limestone (8-Tu) presents a high swelling during the drying process in the presence of a magnesium sulphate solution. The changes in length produced by cyclic salt loading inside the stone generate a strength greater than the tensile strength of the stone, thus causing a fracture and loosening of rock fragments in a very short space of time.

-From a geological point of view the Tudela Campanile limestone (8-Tu) and the Fraga Campanile limestone (9-Fr) are limestones of the same age and present the same microfacies. However, Fraga limestone does not show signs of weathering by swelling of the rock during the drying process in the presence of a magnesium sulphate solution.

-The nature of this process is not totally understood and further investigations are necessary. It seems probable that the main factors for the appearance of this pathology are the pore system and the organic matter present in this rock.

-The durability of these stones has been evaluated by the salt crystallization weathering test. The result for this test indicates that the carbonated rock Blancas 31-B12 and the sandstones Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) and Alcañiz (10-Az) present the greatest weight loss after the salt crystallization test. The weight lost for the others rocks is less than 0.5% of the initial dry weight.

-Alcaliz (10-Az) sandstone presents a better behaviour than Uncastillo (6-Un) and Ayerbe (7-Ay) sandstone during the salt crystallization test. The hydric behaviour of Alcañiz stone is excellent, with very high water absorption and drying rates and essentially no water retention. The less satisfactory behaviour of the Ayerbe and Uncastillo sandstones may be attributed to their pore systems which present slow absorption as well as an increase moisture retention during the drying process. Alcaliz sandstone has a higher percentage of macroporosity and a higher average pore entrance size than Uncastillo and Ayerbe sandstone.

-The pores size distribution is a key factor influencing the susceptibility of natural building stone to weathering processes. This parameter is more important than the total porosity of the stone.

-It is difficult to predict the behaviour of the different consolidants. Therefore a detailed study of the different stones and treatments is necessary in order to determine the future behaviour of these stones. The depth of penetration varies according to the consolidants and the application method used. Inorganic consolidants present a higher depth of penetration than Paraloid B-72. The depth of penetration has been higher in sandstones than in the limestone.

-The results for the salt crystallization test in Blancas (31-B12) indicates that the use of the three consolidants produced a significant increase in both, the resistance against salt crystallization and in Shore D Hardness. All products produce the same changes in the hydric properties and the colour changes obtained are less than 5%.

-The results for the salt crystallization test in Uncastillo (6-Un) and Ayerbe (7-Ay) sandstones indicate that the use of Paraloid applied by either method or Lithium silicate applied by brushing are not recommended. Samples treated with Potassium silicate applied by immersion achieve the best results against the salt crystallization test.

-The results for the salt crystallization test in Alcañiz (10-Az) sandstone indicates that the use of both Paraloid and Lithium silicate applied by either method are not recommended. Samples treated with Potassium silicate applied by immersion have the best results against the salt crystallisation test (table VIII-9).

Development of technological solutions and/or application of previous techniques to the characterization of building materials.

-The automatization of hydric test has allowed us to developed a technological solution for determining pore size distribution in stones "Porosimeter measuring the intrusion of low-density fluids" International Application Patent No PCT/ES2006/000681 and Priority Data 22-12-2005.

-The automatization of changes in length during salt crystallization test has made it possible to understand the behaviour of campanile limestone during the drying process in the presence of a magnesium sulphate solution.

-The use of pre-existing statistical analyses to evaluate the permeability measurements has allowed us to determine the textural and structural characteristics which are the potential points of decay in the early weathering stages and hence aid in the prediction of the weathering behaviour of the stones.

TABLA RESUMEN DE LAS ROCAS CARACTERIZADAS

Unidad Geológica	Número Sigla	Nombre Científico	Localidad	Variaciones		
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		
Comarca de Huesca	Rama Aragonesa	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		

LISTA DE SÍMBOLOS

- D**- Diámetro de acceso de poro (μm).
- σ - Tensión superficial del mercurio.
- θ - Ángulo de contacto mercurio sólido.
- P**- Presión ejercida sobre el mercurio para que se intruya en los poros de diámetro (**D**) (Kg/cm^2).
- ϵ - Dilatación lineal. Expresado en 10^{-4} .
- ΔL - Variación de longitud $L_1 - L_0$.
- L_0 - Longitud inicial (mm).
- L_1 - Longitud final (mm).
- P'**- Grado de anisotropía magnética.
- T**- Forma de los elipsoides magnéticos.
- Km**- Susceptibilidad magnética media ($\times 10^{-6}$ SI units).
- W**- Contenido en humedad, expresado en forma de porcentaje (%).
- ρ_b - Densidad aparente de la probeta (Kg/m^3).
- ρ_{rph} - Densidad real de la probeta (Kg/m^3). (Método balanza hidrostática).
- ρ_{rh} - Densidad del agua (Kg/m^3).
- P_o**- Porosidad abierta, expresado en forma de porcentaje (%).
- ρ_r - Densidad real de la probeta (Kg/m^3). (Método del Picnómetro).
- P**- Porosidad total de la probeta, expresado en forma de porcentaje (%).
- P_{in}**- Porosidad inaccesible, expresado en forma de porcentaje (%).
- S_t**- Grado de saturación para un tiempo dado, expresado en forma de porcentaje (%).
- T_{wt}**- Tiempo que tarda la probeta en alcanzar un contenido en humedad determinado respecto al total de la absorción ($\text{s}^{1/2}$).
- W_d**- Contenido en agua en desorción, expresado en forma de porcentaje (%).
- W_{cri}**- Contenido en agua crítico, expresado en forma de porcentaje (%).
- A.C.**- Absorción de agua por capilaridad (g/m^2).
- C.A.C.**- Coeficiente de absorción capilar ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$).
- A**- Anisotropía del material a partir de la velocidad de propagación de ultrasonidos.
- m_s**- Masa de la probeta saturada, en gramos (gr).
- m_d**- Masa de la probeta seca, en gramos (gr).
- m_{d2}**- Masa de la probeta seca tras extraer las sales depositadas durante el ensayo de cristalización de sales, en gramos (gr).
- m_h**- Masa de la probeta sumergida en agua (pesada hidrostática), en gramos (gr).
- m₁**- Masa del picnómetro lleno con agua y con la probeta triturada, en gramos (gr).
- m₂**- Masa del picnómetro lleno con agua, en gramos (gr).
- m_e**- Masa de la probeta seca y triturada (método del picnómetro), en gramos (gr).
- m_t**- Masa de la probeta para un tiempo dado, en gramos (gr).
- m_{de}**- Masa de la probeta seca en condiciones ambientales, en gramos (gr).
- a**- Área de la cara de la probeta sumergida en agua, en m^2 .
- t_i**- Tiempos transcurridos desde el inicio del ensayo hasta el momento en el que las masas sucesivas m_i se miden, en segundos.
- V**- Velocidad de propagación del sonido (m/s).
- e**- Espacio entre los transductores del equipo de ultrasonidos (m).
- t**- Tiempo que tarda la onda V_p en propagarse del emisor al receptor en segundos.
- V_{pmax}**- Velocidad máxima de propagación de las ondas V_p .
- V_{pmin}**- Velocidad mínima de propagación de las ondas V_p .

LISTA DE TABLAS

Tabla III-1: Capítulos de la memoria en que se describen los resultados de los ensayos y técnicas analíticas utilizadas.

Tabla III-2: Ensayos de caracterización mecánica, normas, dimensiones y orientación de las probetas. (A) estratificación perpendicular al esfuerzo aplicado. (B) estratificación paralela al esfuerzo aplicado (perpendicular lado corto). (C) estratificación paralela al esfuerzo aplicado (perpendicular lado largo).

Tabla IV-1: Cuadro síntesis de las características geológicas de las rocas caracterizadas.

Tabla IV-2: Cuadro síntesis de clasificación de las rocas caracterizadas.

Tabla IV-3: Tabla de tiempo geológico con la ordenación temporal de los materiales caracterizados.

Tabla V-1: Cuadro síntesis de clasificación de las rocas caracterizadas.

Tabla V-2: Cuadro resumen de los usos constructivos de las rocas caracterizadas.

Tabla V-3: Ensayos tecnológicos realizados en función del uso constructivo predominante.

Tabla V-4: Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R.

Tabla V-5: Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R.

Tabla V-6: Composición textural en porcentaje de las arenitas eocenas Pirenaicas.

Tabla V-7: Ecuaciones de las rectas de regresión y coeficientes de correlación R.

Tabla V-8: Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R.

Tabla V-9: Ecuación de la recta de regresión y coeficiente de correlación R entre porosidad y propiedades mecánicas.

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 mas cuarzo se ha recalculado sobre el 100%.

Tabla V-11: Análisis de regresión simple entre resistencia mecánica a compresión y los parámetros petrográficos determinados.

Tabla V-12: Análisis de regresión simple entre resistencia mecánica a flexión y los parámetros petrográficos determinados.

Tabla V-13: Rocas con valores en el coeficiente de variación para el ensayo de absorción superior a 0,3.

Tabla V-14a: Valores de H_0 en las rocas areníticas.

Tabla V-14b: Valores de H_0 en las biomicritas.

Tabla V-14c: Valores de H_0 en los carbonatos recristalizados.

Tabla V-14d: Valores de H_0 en las bioesparitas.

Tabla V-15: Cuadro resumen con los ensayos tecnológicos principales en función del uso de la Piedra Natural.

Tabla V-16: Espesor mínimo requerido (cm) para una baldosa de 80X40 cm para cada una de las rocas caracterizadas en función del uso.

Tabla VI-1: Composición mineralogía (expresada en porcentaje) y parámetros petrográficos de las rocas detríticas (Q-cuarzo, Fto-feldespato, Ox Fe-Óxidos de hierro).

Tabla VI-2: Composición mineralogía (expresada en porcentaje) y parámetros petrográficos de las rocas carbonatadas (Q-cuarzo).

Tabla VI-3: Valores del residuo y del contenido de agua, materia orgánica y CO_2 para las rocas carbonatadas, expresados en porcentaje.

Tabla VI-4: Resultado del análisis geoquímico de elementos mayores expresados en porcentaje en peso de óxidos, para las rocas detríticas.

Tabla VI-5: Resultado del análisis geoquímico de elementos mayores expresados en porcentaje en peso de óxidos, para las rocas carbonatadas.

Tabla VI-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.

Tabla VI-7: Parámetros obtenidos mediante análisis digital de imágenes.

Tabla VI-8: Ensayos hídricos realizados y parámetros calculados.

Tabla VI-9: Resultados de los ensayos de absorción W (%), densidad aparente ρ_b (Kg/m^3), densidad real método pesada hidrostática ρ_{rph} (Kg/m^3) y porosidad abierta P_0 (%). Rocas ordenadas en función de su W.

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 (%) y porosidad inaccesible P_{in} (%). Rocas ordenadas en función de su P_0 .

Tabla VI-11: Resultados de saturación a 1 hora S_1 (%), saturación a 24 horas S_{24} (%), saturación a 48 horas S_{48} (%), tiempo de saturación al 25% TW_{25} ($s^{1/2}$), tiempo de saturación al 50% TW_{50} ($s^{1/2}$) y tiempo de saturación al 75% TW_{75} ($s^{1/2}$). Rocas ordenadas en función de su S_1 .

Tabla VI-12: Resultados del contenido de agua en desorción W_d (%) y contenido en agua crítico W_{cri} (%). Rocas ordenadas en función de su W_d .

Tabla VI-13: Valores del coeficiente de absorción capilar C.A.C. ($g/m^2s^{-0.5}$), absorción capilar A.C (g/m^2) y grado de saturación (%). Rocas ordenadas en función de su C.A.C.

Tabla VI-14: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Tabla VI-15: Componentes del variograma.

Tabla VI-16: Rocas ordenadas en función del valor del coeficiente de anisotropía para las medidas de permeabilidad.

Tabla VI-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.

Tabla VI-18: Resultados de los valores de anisotropía de la velocidad propagación de ultrasonidos tanto en roca seca como en roca saturada.

Tabla VI-19: W - contenido en humedad (%); P_0 - porosidad abierta (%); P - porosidad total (%); S_1 - coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d - retención de agua tras secado (%); W_{cri} - contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($g/m^2s^{-0.5}$), S_c - saturación capilar (%).

Tabla VI-20: W - contenido en humedad (%); P_0 - porosidad abierta (%); P - porosidad total (%); S_1 - coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d - retención de agua tras secado (%); W_{cri} - contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($g/m^2s^{-0.5}$), S_c - saturación capilar (%).

Tabla VI-21: W - contenido en humedad (%); P_0 - porosidad abierta (%); P - porosidad total (%); S_1 - coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d - retención de agua tras secado (%); W_{cri} - contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($g/m^2s^{-0.5}$), S_c - saturación capilar (%).

Tabla VI-22: W - contenido en humedad (%); P_0 - porosidad abierta (%); P - porosidad total (%); S_1 - coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d - retención de agua tras secado (%); W_{cri} - contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($g/m^2s^{-0.5}$), S_c - saturación capilar (%).

Tabla VII-1: Propiedades físicas y químicas de las soluciones salinas utilizadas a 20°C. Datos obtenidos del CRC Handbook of Chemistry and Physics (2005).

Tabla VII-2: Variación en peso de las rocas tras la realización del ensayo de cristalización de sales expresado en porcentaje respecto al peso inicial de las probetas. (El resultado es el valor medio de la pérdida en peso para tandas de tres probetas).

Tabla VII-3: Valores iniciales, finales y variación en porcentaje tras la cristalización de sales del contenido en humedad (W), porosidad abierta (P_0) y del coeficiente de absorción capilar (C.A.C.).

Tabla VII-4: Valores del coeficiente de variación y de la desviación estándar para el contenido en humedad y el coeficiente de absorción capilar antes y después del ensayo de cristalización de sales.

Tabla VII-5: Variación en la porosidad respecto al material inalterado tras la cristalización de sales de sulfato de magnesio y cloruro sódico al 5% y al 15%.

Tabla VII-6: Variación en porcentaje de la permeabilidad en cada una de las caras caracterizadas tras el ensayo de cristalización de sales.

Tabla VII-7: Variación en porcentaje de la permeabilidad media tras la cristalización de sales.

Tabla VII-8: Valores de anisotropía tanto para la roca inalterada como para la roca alterada.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Tabla VII-11: Variaciones de permeabilidad tras la cristalización de sales respecto de la roca fresca. Los materiales se han ordenado en tres grupos siguiendo la clasificación fijada en función del porcentaje en volumen para las principales clases de tamaño de acceso de poro calculada por porosimetría de mercurio.

Tabla VII-12: Valores de expansión máxima e irreversible para cada uno de los ciclos en el ensayo de expansión.

Tabla VII-13: Valores de variación en volumen en la roca 8-Tu expresados en porcentaje respecto del volumen inicial.

Tabla VII-14: Valores de los diferentes coeficientes calculados a partir de la ASM. N - número de especímenes, K_m - susceptibilidad media de cada espécimen, T - forma de los elipsoides magnéticos y P' - grado de anisotropía magnética.

Tabla VII-15: Fábrica magnética del material en cada uno de los estadios.

Tabla VIII-1: Variación en porcentaje del contenido en humedad (W) y de la porosidad abierta (P_0) tras la aplicación de los consolidantes respecto de los valores de la roca no tratada.

Tabla VIII-2: Variación en porcentaje en la densidad aparente (ρ_b) y en la densidad real hídrica (ρ_{rph}) tras la aplicación de los consolidantes respecto de los valores de la roca no tratada.

Tabla VIII-3: Variación en porcentaje respecto del valor inicial del coeficiente de absorción capilar tras aplicar los consolidantes.

Tabla VIII-4: Parámetros cromáticos y variación en el color de roca total para cada uno de los tratamientos aplicados.

Tabla VIII-5: Valores totales de agua absorbida en gramos para diferentes tiempos del ensayo para una misma probeta antes y después de su consolidación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio y Pa - paraloid. En negrita aparecen los intervalos en los que la absorción es mayor tras consolidar la probeta.

Tabla VIII-6: Variación en porcentaje respecto de la dureza Shore D inicial de las probetas tras la consolidación. (S.L- silicato de litio; S.K- silicato de potasio; Pa-paraloid).

Tabla VIII-7: Variación en peso de las rocas tras la realización del ensayo de cristalización de sales expresado en porcentaje respecto al peso inicial. S.C.- probetas sin consolidar; SK IN- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por inmersión; SK BR- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por brocha; SL IN- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por inmersión; SL BR- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por brocha; PA IN- probetas consolidadas con paraloid aplicado por inmersión; PA BR- probetas consolidadas con paraloid aplicado por brocha.

Tabla VIII-8: Variación en porcentaje tras la cristalización de sales en la roca 31-BI2 del contenido en humedad (W), porosidad abierta (P_0) y coeficiente de absorción capilar (C.A.C.).

Tabla VIII-9: Variación en porcentaje de la pérdida en peso, color (ΔE), coeficiente de absorción capilar (C.A.C.), porosidad abierta (P_0), absorción (W) y dureza superficial Shore D tras aplicar los consolidantes. SK IN- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por inmersión; SK BR- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por brocha; SL IN- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por inmersión; SL BR- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por brocha; PA IN- probetas consolidadas con paraloid aplicado por inmersión; PA BR- probetas consolidadas con paraloid aplicado por brocha.

LISTA DE FIGURAS

Figura III-1: Rutina de trabajo seguida para cada sección. 1 imagen nicoles paralelos; 2 imagen nicoles cruzados; 3 imagen tomada con fluorescencia; 4 imagen binarizada; 5 imagen acoplada; 6 imagen microscopio electrónico. Imágenes 1-5 escala 100 μm (x20), imagen 6 escala 20 μm (x1050).

Figura III-2: Dispositivo utilizado para el ensayo de absorción automatizado.

Figura III-3: Equipo utilizado para el ensayo de expansión lineal.

Figura III-4: Equipo utilizado para el ensayo de expansión volumétrica y portamuestras con la posición de la probeta durante la realización del ensayo.

Figura III-5: Equipo utilizado para el ensayo de permeabilidad y probeta con la malla regular de 1 cm de espaciado.

Figura IV-1: Mapa de situación geográfica con la ubicación de las explotaciones caracterizadas.

Figura IV-2: Mapa geológico de Aragón con la ubicación de las explotaciones caracterizadas (modificado de Peña Monné, 1995).

Figura IV-3: Mapa geológico de la Cordillera Pirenaica con la ubicación de las explotaciones (modificado de Teixell, 1996).

Figura IV-4: Mapa geológico de la Depresión Central con la ubicación de las explotaciones (modificado de Alonso-Zarza *et al.*, 2002).

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).

Figura V-1: Clasificación de las arenitas (tomada de Pettijohn *et al.*, 1987).

Figura V-2: Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Folk, 1962).

Figura V-3: Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Dunham, 1962).

Figura V-4: Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Wright, 1992).

Figura V-5: Gráficos de correlación entre resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión con la porosidad abierta en arenitas.

Figura V-6: Gráficos de correlación entre resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión con la porosidad.

Figura V-7: Gráfica de correlación entre resistencia mecánica a compresión real y la predecida por análisis de correlación múltiple.

Figura V-8: Gráfica de correlación entre resistencia mecánica a flexión real y la predecida por análisis de correlación múltiple.

Figura V-9: Relación entre resistencia mecánica a compresión y clasificación textural de las rocas carbonatadas.

Figura VI-1: Porosidad abierta y porosidad cerrada en una representación en 2D (modificada de Bourguès, 2006).

Figura VI-2: Modelos de aire atrapado durante los procesos de absorción capilar. a.: "rugosity"; b.: "bypass" (tomado de Bousquie, 1979).

Figura VI-3: Relación entre la suma de sílice y alúmina frente a sodio más potasio expresado en porcentaje en peso de óxidos.

Figura VI-4: Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo A-1 (12-Ca) y del grupo A-2 (8-Tu).

Figura VI-5: Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo B (9-Fr).

Figura VI-6: Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo C (31-B13).

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.

Figura VI-7b: Distribución porométrica de las arenitas estudiadas. En abscisas se representa el tamaño de poro en micras y en ordenadas la porosidad en porcentaje.

Figura VI-8: Curva de absorción libre de agua en la roca 8-TU. (Grupo A)

Figura VI-9: Curva de absorción libre de agua en la roca 12-Ca. (Grupo B).

Figura VI-10: Curva de absorción libre de agua en la roca 6-Un. (Grupo C).

Figura VI-11: Rocas ordenadas en función del grado de saturación en 1 hora (S_1).

Figura VI-12: Curva de evaporación en la roca 8-Tu (grupo A).

Figura VI-13: Curva de evaporación en la roca 13-Pu (grupo B).

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 .

Figura VI-16: Curva de absorción capilar de 8-Tu (Grupo A).

Figura VI-17: Curva de absorción capilar de 13-Pu (Grupo B).

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.

Figura VI-20: Modelo de variograma experimental (tomado de McKinley *et al.*, 2006).

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-B11 con los variogramas, mapas de distribución de permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas.

Figura VI-23: Rocas ordenadas según su velocidad de propagación de ultrasonidos en roca seca perpendicular a la estratificación en orden decreciente.

Figura VI-24: Relación entre el tamaño medio de la microporosidad frente a la proporción de micrita respecto de la suma de microesparita y esparita.

Figura VII-1: Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa de la mirabilita y thenardita (tomada de Steiger and Dannecker, 1988).

Figura VII-2: Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa del sistema $MgSO_4 \cdot H_2O$ (tomada de Steve *et al.*, 2006).

Figura VII-3: Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa para el cloruro de sodio (tomada de Ruedrich *et al.*, 2007).

Figura VII-4: Aspecto de una de las probetas de la roca 10-Az en los ciclo 0 (foto izquierda) y 15 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-5: Aspecto de una de las probetas de la roca 7-Ay en los ciclo 0 (foto izquierda) y 15 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-6: Aspecto de una de las probetas de la roca 6-Un en los ciclo 0 (foto izquierda) y 15 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-7: Aspecto de una de las probetas de la roca 31-B12 en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-8: Aspecto de una de las probetas de la roca 17-CFS en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-9: Aspecto de una de las probetas de la roca 29-A en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-10: Aspecto de una de las probetas de la roca 9-Fr en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

Figura VII-11: Gráfica de variación en peso para probetas de la roca 31-B12 (Grupo A) y 13-Pu (Grupo B).

Figura VII-12: Curvas de absorción capilar de las rocas 16-VI-I y 9-Fr antes y después del ensayo de cristalización de sales. Cada curva representa el valor medio de tres probetas.

Figura VII-13: Ficha de la roca 31-B11 con los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas tras la cristalización del sulfato magnésico heptahidratado.

Figura VII-14: Ficha de la roca 31-B11 con los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas tras la cristalización del cloruro sódico.

Figura VII-15: Expresión morfológica de la patología en función de la posición de la estratificación y del acabado de la pieza litológica.

Figura VII-16: Gráfica de expansión lineal de una probeta de caliza campanil 8-Tu. Duración del ensayo 110 días. Las flechas indican el momento en el que se sumergen las probetas en agua destilada en el ciclo 1 y en solución salina en el resto de los ciclos. La duración de la inmersión de las probetas es de 24 h.

Figura VII-17: Curvas con la evolución de la temperatura y de la humedad relativa a lo largo de la duración del ensayo. Las flecha al igual que en la figura 12 muestran el momento de la saturación del material.

Figura VII-18: Gráfica de expansión de una probeta de caliza Campanil 8-Tu. Cada uno de los ciclos se puede dividir en 3 etapas. En la primera etapa (A) la probeta sometida a registro continuo de su longitud se sumerge en una solución de 50 gr./l de sulfato magnésico, en la segunda etapa (B) tiene lugar el secado del material y finalmente en la tercera etapa (C) tiene lugar su rehidratación.

Figura VII-19: Ciclo 0 de la figura en 3D de la probeta Tu-1.

Figura VII-20: Relación entre K_m y P' para cada roca en los tres estadios diferentes.

Figura VII-21: Diagramas de anisotropía para cada roca correspondientes a los tres estadios.

Figura VII-22: Estereogramas, en los que se representan los ejes magnéticos de susceptibilidad mínima (círculos), intermedia (triángulos) y máxima (cuadrados).

Figura VIII-1: A) Probeta de 10-Az consolidada con silicato de potasio aplicado por inmersión x1800. Detalle del craquelado característico que se ha producido en las acumulaciones superficiales del producto. B) Probeta de 31-B12 consolidada con silicato de potasio aplicado por inmersión X3000.

Figura VIII-2: A) Probeta de 6-Un consolidada con silicato de litio aplicado por inmersión x1000. B) Probeta de 31-B12 consolidada con silicato de litio X3000. El producto precipitado es un gel de sílice amorfo microfisurado.

Figura VIII-3: A) Probeta de 10-Az consolidada con Paraloid B-72 X1800. Disposición heterogénea formando cuellos interparticulares sin producir la oclusión de la porosidad. B) Probeta de 31-B12 consolidada con Paraloid X 7500.

Figura VIII-4: Curvas de absorción capilar. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- paraloid, In- inmersión y Br- brocha.

Figura VIII-5: Fotografías de la superficie del material pétreo antes y después de la aplicación de los consolidantes. De izquierda a derecha aparecen las fotos del material sin tratar, consolidado con silicato de potasio, silicato de litio y paraloid B-72.

Figura VIII-6: Gráficas de gramos de agua absorbidos respecto al tiempo. En azul se ha representado la absorción para una misma probeta antes de la aplicación del silicato de litio (línea continua) y después de su aplicación (línea discontinua). En rojo se han representado, siguiendo la misma metodología, las probetas tratadas con silicato de potasio y en verde las tratadas con paraloid.

Figura VIII-7: Curvas de desorción antes de aplicar los consolidantes (línea continua) y después de aplicar los consolidantes (línea discontinua) en las mismas probetas. Las probetas tratadas con silicato de litio se han representado con color azul, las probetas tratadas con silicato de potasio se han representado con color rojo y las probetas tratadas con paraloid se han representado con color verde.

Figura VIII-8: Gráficas de variación en peso. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- paraloid, In- inmersión y Br- brocha.

Figura VIII-9: Formas de alteración en las arenitas tratadas 6-Un, 7-Ay y 10-Az tras 15 ciclos de cristalización de sales. A) Sin alteración (10-Az Silicato de potasio-inmersión); B) Arenización débil (10Az paraloid-inmersión); C) Desagregación granular y desplazación (6-Un silicato de potasio-brocha); D) Arenización homogénea (7-Ay paraloid-brocha).

Figura VIII-10: Formas de alteración en la roca 31-B12 tras 30 ciclos de cristalización de sales. A) Probeta tratada con silicato de potasio aplicado por brocha; B) Probeta tratada con paraloid aplicado por inmersión.

Figura VIII-11: Curvas de absorción capilar tras el ensayo de cristalización de sales en la roca 31-B12. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 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 previos 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 construidos 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 enuncio 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 fílsiles 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 tratamientos 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.

I.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; Tugçrul 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 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 SO₂, NO_x, H₂SO₄, HNO₃ (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 segunda 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 (Sneathlage 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; Rodríguez-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.

CAPÍTULO II.- OBJETIVOS

CAPÍTULO 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.

CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA

CAPÍTULO 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. Con el objetivo de evitar una reproducción del contenido de las normas UNE en este apartado no se van a describir los procedimientos de los ensayos realizados según esta normativa, indicando únicamente 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	-----	

III.2.- Ensayos de caracterización petrológica y mineralógica.

III.2.1.- Microscopía petrográfica. Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico. UNE-EN 12407:2001.

La caracterización petrográfica se ha realizado según el procedimiento descrito en la norma “Métodos de ensayo para piedra natural, estudio petrográfico. UNE-EN 12407:2001”. El estudio petrográfico permite, a partir de una sección bidimensional, definir la composición mineralógica y las características texturales de la roca (Russell, 1927). Este estudio ha consistido en una descripción de la textura general de la roca, identificación mineralógica de los componentes presentes en el material y descripción de parámetros texturales de especial relevancia para la interpretación petrofísica.

Los porcentajes indicados para cada uno de los componentes de las rocas corresponden a porcentajes en volumen y se han obtenido por contaje de puntos según la metodología de Gazzi-Dickinson (Ingersoll *et al.*, 1984).

Los constituyentes de las rocas areníticas se han dividido en tres grupos: clastos, matriz y cemento. Las características petrográficas de interés tecnológico descritas han sido: estimación de la abundancia relativa de cada constituyente, selección, tamaño medio, tamaño máximo, esfericidad, redondez, tipo de contacto entre los granos y porosidad.

Los constituyentes de las rocas carbonatadas se han dividido en dos grupos: ortoquímicos (matriz y cemento) y aloquímicos (granos esqueléticos y granos no esqueléticos). Las características petrográficas de interés tecnológico descritas han sido: estimación de la abundancia relativa de cada constituyente, tamaño de los granos, relación entre matriz y cemento, tipos de contactos, porosidad y tipos y tamaño de la matriz y del cemento.

El equipo utilizado ha sido un microscopio óptico polarizante de luz transmitida modelo Carl Zeiss Jena-Pol. Las láminas delgadas y delgado pulidas se elaboraron en el Servicio de Apoyo a la Investigación (S.A.I.) de preparación de rocas y materiales duros de la Universidad de Zaragoza. Se tiñeron siguiendo la tinción de Evamy (1963) mezcla de alizarina roja S y ferrocianuro potásico para la identificación de la composición de los carbonatos.

El número de láminas estudiadas para cada material ha dependido de su homogeneidad y de las variedades que presentaba, oscilando el número de láminas entre tres para rocas homogéneas y ocho para rocas heterogéneas o rocas en las que se han caracterizado distintas variedades.

III.2.2.- Microscopía electrónica de barrido.

La microscopía electrónica de barrido es una técnica que permite obtener información directa de la forma, tamaño y distribución del sistema poroso de una roca (Honjo and Fischer, 1965). Esta técnica nos ha permitido evaluar la distribución y penetración en el interior de la red porosa de los diferentes tratamientos de protección aplicados.

El estudio de las muestras se ha realizado mediante un microscopio electrónico de barrido Zeiss, modelo DSM 942 equipado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X LINK, modelo Pentafet y un detector de electrones retrodispersados Oxford, modelo Tetra Link, en el CEDEX (Laboratorio central de estructuras y materiales), y el equipo Joel JSM 6400 del S.A.I. de microscopía electrónica de la Universidad de Zaragoza.

Las muestras utilizadas para el estudio de estos materiales fueron fragmentos de roca y láminas delgadas pulidas. Las muestras, fueron previamente metalizadas mediante un recubrimiento conductor de 100 a 200 Å de espesor, obtenido por la evaporación a vacío de una placa de Au-Pd. La metalización de las muestras se ha realizado de forma automática, mediante una metalizadora Emitech K550.

III.2.3.- Análisis digital de imágenes aplicado a la microscopía óptica y electrónica.

La técnica del análisis digital de imágenes aplicado al microscopio óptico se ha utilizado para la caracterización del sistema poroso en las arenitas terciarias del Valle del Ebro.

El equipo empleado ha sido un microscopio Leica modelo DMRX, equipado con un sistema automático de fotografía, equipo fluorescencia Ebq 100 y cámara Sony power had 3ccd color video cámara modelo dxc-950p. Las láminas delgadas fueron previamente impregnadas al vacío con una resina fluorescente (resina Epoxy SP-115 y colorante Epodye) (Caye *et al.*, 1970) con un doble objetivo, conseguir un mayor contraste al microscopio entre las zonas porosas y las zonas minerales y por otro lado para discriminar los poros reales de los artefactos generados durante la realización de las láminas delgadas.

El análisis digital de imagen (ADI) se puede definir como el proceso al que se somete una imagen para generar otra que conserva ciertas características de la original (Davis, 1983). Esta técnica permite transformar la imagen de partida en una final, de la cual podemos extraer datos reales del objeto del estudio, en este caso porcentaje de porosidad, tamaño y geometría de los poros. El análisis digital de imágenes es una herramienta importante para caracterizar el comportamiento de materiales cuando es necesaria información morfológica (Coster y Chermant 1989).

De cada una de las tres arenitas se realizaron 4 láminas delgadas estudiando 20 secciones en cada una de ellas. El aumento con el que se ha realizado el estudio de cada sección se ha determinado en función del tamaño de los poros que presentaba la roca.

De cada sección se ha realizado una serie de tres fotografías mediante la cámara acoplada al microscopio. La fotografía 1 se realizó con nícoles paralelos y luz transmitida (figura III-1.1), la fotografía 2 se realizó con nícoles cruzados y luz transmitida (figura III-1.2) y la fotografía 3 se realizó con nícoles paralelos y fluorescencia con luz reflejada (figura III-1.3). Una vez obtenidas las imágenes con el microscopio óptico se comenzó a trabajar con el programa de análisis digital de imágenes Image-pro plus versión 4.5.

Inicialmente se procedió al calibrado y mejora de la imagen de partida previo a su binarización (una imagen binaria consta de dos tonos blanco y negro y en nuestro caso los píxels negros representan zona mineral mientras que los píxels blancos representan zonas porosas). Esta mejora de la imagen consiste en la realización de una serie de realces visuales para conseguir un mayor contraste entre la zona porosa de color verde fluorescente y las zonas grises correspondientes a los minerales constituyentes de la roca.

La segmentación es el proceso más importante, mediante este proceso se realiza la transformación de la imagen digital en una nueva imagen binaria sobre la que se realizaran las cuantificaciones de las propiedades objeto de estudio (Prendes, 1992). Este proceso consiste en discriminar la fase a estudiar por procesos digitales, por los cuales ciertos colores de una imagen pueden ser identificados visualmente y agrupados en clases. Sobre esta imagen binaria se aplican una serie de filtros para mejorar la imagen (Crabtree *et al.*, 1988). Estos filtros consisten en una serie de algoritmos, gracias a los cuales se consiguen mejorar los bordes de la fase porosa y eliminar el ruido generado durante la segmentación. Los filtros más utilizados durante la elaboración de este trabajo han sido los morfológicos. Una vez que tenemos la imagen binarizada (figura III-1.4) se realiza la cuantificación del fenómeno observado, en este caso la porosidad, volcando los datos obtenidos por el programa informático directamente a hojas de cálculo.

Una vez finalizado el tratamiento de la imagen y con el objetivo de comprobar si la discriminación de las zonas porosas ha sido correcta, se han combinado imágenes individuales en una sola imagen compuesta, combinando la fotografía inicial (figura III-1.1) con la imagen binarizada (figura III-1.4) obteniendo una imagen acoplada (figura III-1.5).

La caracterización de la porosidad mediante el microscopio petrográfico está condicionada a la resolución de la imagen de partida, por ello, esta técnica presenta problemas a la hora de caracterizar rocas con importante microporosidad o bien rocas que presentan clastos con un elevado índice de microporosidad (Pittman and Duschatko, 1970). Para estudiar la microporosidad de estos elementos se trabajó con el microscopio electrónico de barrido (figura III-1.6) siguiendo la misma metodología propuesta en el apartado anterior.

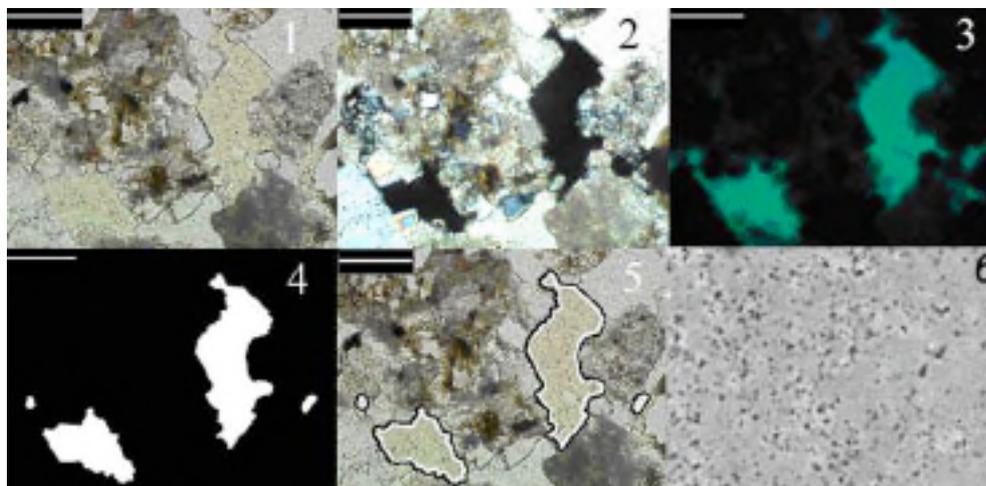


Figura III-1: Rutina de trabajo seguida para cada sección. 1 imagen nícoles paralelos; 2 imagen nícoles cruzados; 3 imagen tomada con fluorescencia; 4 imagen binarizada; 5 imagen acoplada; 6 imagen microscopio electrónico. Imágenes 1-5 escala 100 μm (x20), imagen 6 escala 20 μm (x1050).

III.2.4.- Análisis químicos de elementos mayores.

La determinación de la composición química en materiales pétreos de usos constructivos permite obtener información de una serie de aspectos que determinan su alterabilidad y durabilidad (Winkler, 1997).

El análisis químico de elementos mayores en las muestras se ha realizado mediante fluorescencia de rayos X en el servicio de análisis de la Universidad de Granada. El equipo utilizado ha sido un espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva con generador de rayos X de 4 KW de potencia, con tubo de rayos X de ventana ultrafina de ánodo de Rh. El equipo es de la marca Philips modelo PW2440 (MagiX-Pro).

La preparación de muestras y patrones es en perla con una dilución 1:10 hecha con tetraborato de litio. El equipo de preparación de las perlas es una perladora Philips modelo Perl'x3.

III.2.5.- Determinación del contenido en carbonato.

El contenido en carbonato se ha determinado mediante el cálculo de la pérdida en peso por ignición (Dean, 1974). Esta técnica se basa en la interpretación de la pérdida en peso tras calentamientos escalonados a 200, 500 y 900°C que corresponden a los contenidos de agua, materia orgánica y CO₂ respectivamente.

El inconveniente de esta técnica son las posibles pérdidas o ganancias en peso que se producen en minerales arcillosos, sulfatos, sulfuros, etc., por las pérdidas de agua estructural, oxidaciones, volatilizaciones, etc.

La determinación del contenido en carbonato se ha realizado en el laboratorio del Área de Petrología y Geoquímica del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

III.2.6.- Determinación del residuo insoluble.

El residuo insoluble se ha determinado por gravimetría tras ataque ácido. El residuo se ha recogido en filtro exento de cenizas y se ha calcinado en crisol de porcelana a 900°C durante 90 minutos.

La ganancia de peso del crisol, expresada en porcentaje en peso con relación al peso de muestra atacada, representa el residuo insoluble que corresponde al contenido de la fracción de minerales arcillosos, cuarzo y otros silicatos detríticos de la roca, no disueltos durante el ataque ácido.

La determinación del residuo insoluble se ha realizado en el laboratorio del Área de Petrología y Geoquímica del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

III.3. Ensayos de caracterización física.

III.3.1.- Absorción, densidad aparente y porosidad abierta. UNE-EN 13755: 2002.

La determinación de la absorción, densidad aparente y porosidad abierta se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica. UNE-EN 13755: 2002”.

El objeto de estos ensayos es cuantificar la absorción, densidad aparente y porosidad abierta (volumen de poros comunicados) de las rocas. Estos parámetros hídricos determinan el comportamiento del material frente al agua. El agua, es un elemento de gran importancia para la caracterización tecnológica del material ya que participa en la mayoría de los procesos de deterioro químicos, físico-químicos y biológicos que afectan a los materiales pétreos. Además, la presencia de agua en el interior de los materiales pétreos genera una reducción en sus propiedades mecánicas.

Estos ensayos permiten determinar la posible adecuación de la piedra natural para su uso en exteriores en zonas húmedas y/o con climas fríos.

III.3.2.- Absorción y desorción automatizado.

El ensayo normalizado de absorción presenta notables problemas de orden experimental para medir el avance de la penetración de agua en la roca durante la duración del ensayo que puede ser de varias semanas. Su punto débil es la manipulación de la probeta que necesita ser extraída manualmente del agua, actuación que va seguida de una eliminación mecánica del exceso de agua en las superficies. Además de la notable interrupción del proceso de absorción que suponen las anteriores manipulaciones, la información obtenida es un registro discontinuo del proceso que necesita de la constante presencia de un operador.

Con el objetivo de obtener registros más fiables hemos diseñado un método de registro continuo sin necesidad de la presencia permanente de un operador (Buj *et al.*, 2007). La representación gráfica de estos datos permite estimar las familias de poros presentes en el material, así como su tamaño relativo. Asimismo, esta técnica permite evaluar las variaciones que se originan en el sistema poroso al introducir en él fluidos de diferentes densidades y viscosidades (soluciones salinas, consolidantes, hidrofugantes).

El citado método se basa en la suspensión de la probeta en una balanza preparada para realizar pesada hidrostática continua y que se encuentra conectada a un ordenador donde vuelca directamente los valores de las pesadas para los intervalos de tiempo definidos (figura III-2). Este método permite evaluar como penetra el agua en la roca de una manera mucho más precisa que el ensayo normalizado.



Figura III-2: Dispositivo utilizado para el ensayo de absorción automatizado.

Estos ensayos se han realizado en un laboratorio con temperatura y humedad constantes (temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad $50 \pm 10\%$). Las probetas utilizadas para la realización del mismo han sido probetas cúbicas de $5 \pm 0,5$ cm de arista. Al igual que en el ensayo clásico de absorción, las probetas se secan inicialmente hasta masa constante (m_d). Una vez secas, se colocan en el portamuestras que está situado en la parte inferior de la balanza y se comienza la toma de datos. A continuación mediante un elevador se eleva un recipiente con agua destilada en el que quedará sumergida la probeta bajo una lámina de agua de 1 cm en condiciones de presión atmosférica. El ensayo termina cuando los poros del material están completamente saturados por agua. La última pesada hidrostática (m_h) es la masa de la probeta saturada en pesada hidrostática. Para finalizar el ensayo se retira el recipiente con agua destilada y se realiza la pesada de la probeta saturada (m_s).

Una vez terminado el ensayo se calcula la absorción de agua, porosidad abierta, densidad aparente y densidad real hidrostática de la probeta de la misma forma que en el ensayo clásico de absorción, pero además con este registro continuo de datos se representa una gráfica de contenido en humedad (W) frente a la raíz cuadrada del tiempo en segundos en la que se observa la dinámica de ganancia en peso con respecto al tiempo.

A la hora de representar gráficamente los valores de absorción hay que tener en cuenta que estamos trabajando con pesadas hidrostáticas y por lo tanto es necesario transformar los valores obtenidos mediante esta técnica.

$$\text{Pesada normalizada para un tiempo (t)} = (m_{ht} * W) / W_h$$

donde m_{ht} es el peso para un tiempo (t) de la probeta en pesada hidrostática, W es la absorción final de la roca y W_h es la absorción de la roca en condiciones de pesada hidrostática, tomando como peso saturado la pesada hidrostática final y como peso seco la pesada hidrostática inicial. Esta aproximación presenta un error, dado que en la primera pesada hidrostática estable ha penetrado una cierta cantidad de agua en el sistema poroso de la probeta. Este error en la primera pesada hidrostática es inferior al 0,1% del valor de esta pesada.

El ensayo de desorción automatizado es similar al ensayo de absorción y se ha realizado siguiendo la misma metodología, pero partiendo en el ensayo de desorción de la muestra saturada y finalizando el ensayo cuando la muestra alcanzada masa constante.

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 desarrollar y perfeccionar el procedimiento de tal forma que, con fecha de prioridad 22/12/2005, ha sido solicitada la patente internacional PCT WO 2007/071802 A1. "Porosimeter measuring the intrusion of low-density fluids".

III.3.3.- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. UNE-EN 1925:1999.

La determinación de la absorción capilar y del coeficiente de absorción capilar, se ha realizado según las recomendaciones de la norma "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. UNE-EN 1925:1999".

Este ensayo muestra la velocidad y el volumen de agua que penetra en el interior de un sólido poroso mediante el mecanismo de succión capilar. La succión capilar del material depende tanto de su porosidad total como del grado de conexión y tamaño de los accesos de poros.

III.3.4.- Densidad real. Método del picnómetro. UNE-EN 1936:2007.

La determinación de la densidad real se ha realizado según las recomendaciones de la norma "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. UNE-EN 1936:2007".

Con este ensayo es posible establecer la relación entre la masa de la probeta seca y el volumen de su parte sólida y calcular, de este modo, la porosidad inaccesible al agua del material. La determinación de la densidad real también permite aproximar el grado de compactación, así como la naturaleza mineral del material.

III.3.5.- Distribución porométrica mediante porosimetría de inyección de mercurio.

En 1921 Washburn indicó la posibilidad de obtener la distribución de tamaños de acceso de poro de un sólido a partir de la penetración en su interior de mercurio, siendo Ritter y Drake (1945) los que desarrollaron el primer porosímetro de mercurio en el que se basan los actuales.

Esta técnica se fundamenta en introducir mercurio en la roca a diferentes presiones. El mercurio es un elemento que, debido a su elevada tensión superficial, se define como un líquido que no moja ya que presenta un ángulo de contacto mayor de 90° para la mayoría de las sustancias naturales. Estas características del mercurio impiden que pueda ser absorbido espontáneamente por el material.

Las presiones necesarias para introducir el mercurio en el sistema poroso del material están directamente relacionadas con el tamaño de acceso de poro. Así, a medida que esta presión aumenta, el mercurio penetra cada vez en poros de menores dimensiones. Controlando el volumen total de mercurio inyectado a cada presión se obtiene el volumen de poros correspondiente para un rango de tamaños determinado.

La ecuación de Washburn permite correlacionar el diámetro de acceso de poro para cada una de las presiones ejercidas (considerando que los poros presentan una morfología cilíndrica):

$$D = 4 \sigma \cos\theta / P$$

donde σ es la tensión superficial del mercurio, θ es el ángulo de contacto mercurio sólido y P es la presión ejercida sobre el mercurio para que se intruya en los poros de diámetro D en (Kg/cm²).

Los equipos utilizados han sido los porosímetros Pascal 140 (macroporosidad) y Pascal 240 (microporosidad) (Thermoquest, 2001). El radio de acceso de poros registrado por el equipo comprende de 0,001 a 1280 μm (de 0,001 a 10 μm el microporosímetro y de 10 a 1280 μm el macroporosímetro). Las probetas utilizadas fueron cilindros de 3 cm de altura y 0,5 cm de diámetro.

Las principales limitaciones de esta técnica son (Rodríguez-Navarro *et al.*, 1994; Mingarro, 1996):

- Los materiales pétreos no están constituidos al 100 % por poros de geometría cilíndrica.
- Los resultados que se obtienen son volumen intruido para los diferentes radios de acceso de poro. En algunos casos, el sistema poroso de la roca posee unos radios de acceso correspondientes al menor tamaño de poro.
- La caracterización de tamaños de poro mediante porosimetría de mercurio requiere la aplicación de grandes presiones que pueden generar fracturas en los componentes minerales de la roca. Para estimar radios de tamaños de 0,01 - 0,005 μm son necesarias presiones de 75 MPa y 150 MPa respectivamente.

III.3.6.- Dilatación lineal por absorción de soluciones salinas y secado extremo.

Este ensayo permite establecer la expansión lineal que presentan ciertos materiales pétreos durante la absorción de diferentes soluciones salinas y su posterior secado.

El ensayo de expansión se ha realizado con probetas prismáticas de 4x4x10 \pm 0,5 cm de arista en las que las caras fueron rectificadas y pulidas. El equipo utilizado fue un comparador electrónico Digico 10 con precisión de 1 micra.

Con el propósito de evitar errores y obtener medidas de gran precisión se realizó una automatización del ensayo de expansión lineal. Para ello se diseñó y fabricó un dispositivo (basándonos en la norma ISRM 1979) consistente en un recipiente de acero inoxidable en el que era posible alojar tanto el comparador electrónico (que estaba a su vez conectado a un ordenador para la adquisición continua de los datos) como la probeta. El recipiente de acero inoxidable (figura III-3) cuenta con un sistema de válvulas que permiten introducir y retirar las soluciones sin la necesidad de manipular la probeta evitando con ello, los posibles errores derivados de su manipulación.

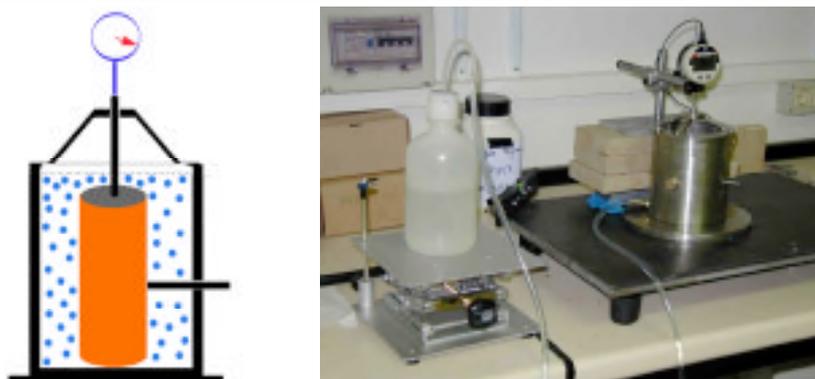


Figura III-3: Equipo utilizado para el ensayo de expansión lineal.

Dada la ausencia de un protocolo estandarizado para la automatización de la medida de la expansión durante la absorción de soluciones salinas y su posterior secado, se estableció el siguiente protocolo:

- 1.-Las probetas se secaron hasta masa constante.
- 2.-Una vez completamente seca la probeta se colocó en el dispositivo de medida obteniendo la longitud inicial de la probeta seca (L_0). A continuación se procedió a saturar la muestra durante 24 horas con agua destilada.
- 3.-Una vez saturada la muestra se retiró el agua del recipiente y se forzó el secado mediante gel de sílice y sepiolita, manteniendo unas condiciones de temperatura de 22 ± 3 °C y de humedad relativa de $20 \pm 5\%$. La etapa de secado se considera terminada una vez que la expansión de la probeta se estabiliza. La duración de esta etapa ha oscilado entre 12 y 17 días.
- 4.-Este proceso se ha repetido introduciendo sucesivas disoluciones de sulfato de magnesio heptahidratado al 5%.

La dilatación lineal viene expresada por el cociente entre el incremento de la longitud de la probeta y su longitud inicial expresado en tanto por diez mil:

$$\varepsilon = (\Delta L/L_0) * 10000$$

donde ΔL es la variación de longitud entre la longitud inicial (L_0) y la longitud final (L_1).

III.3.7.- Expansión volumétrica.

El objetivo de este ensayo es evaluar los cambios de volumen que tienen lugar en ciertos materiales pétreos durante la absorción de soluciones salinas y su posterior secado.

Las probetas utilizadas fueron cubos de 7 cm de arista en los que las caras fueron rectificadas y pulidas para facilitar la exactitud y reproducibilidad de la medida. El equipo utilizado fue un Object Scan 3D de la marca Konica Minolta Vivid 9i non-contact 3D, basado en el principio de la triangulación láser midiendo una superficie de 640x480 puntos en cada escaneo adquiriendo simultáneamente forma, superficie y color con una precisión de 0,002 mm.

Para realizar el ensayo se confeccionó un portamuestras situado a una distancia fija respecto al Object Scan (figura III-4). Para cada ciclo y cada muestra se realizó una tanda de 4 fotografías. La posición de la probeta como se observa en la figura III-4, permitió que cada una de las fotografías se solapase con la anterior un 25% y con la posterior otro 25%. De esta forma se obtenían puntos comunes con los cuales fue posible confeccionar figuras virtuales en 3D sobre las que se han realizado los diferentes cálculos de expansión.

Esta serie de fotografías se tomaron antes de comenzar el ensayo (medidas de referencia) y tras finalizar cada uno de los ciclos. El primer ciclo consistió en la inmersión de las probetas durante 6 horas en agua destilada y su posterior secado en una cámara climática bajo unas condiciones constantes de 36 °C y 15% de humedad relativa durante 7 días. En los ciclos sucesivos, se mantuvo la misma metodología de trabajo pero se sustituyó el agua destilada por una solución de sulfato de magnesio heptahidratado al 5%.



Figura III-4: Equipo utilizado para el ensayo de expansión volumétrica y portamuestras con la posición de la probeta durante la realización del ensayo.

III.3.8.- Anisotropía de susceptibilidad magnética.

La anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) es una técnica que se basa en la medida de la variación de la susceptibilidad en un volumen estándar de roca cuando un campo magnético de baja intensidad ($\leq 1\text{mT}$) es aplicado en diferentes direcciones. Las variaciones pueden ser descritas matemáticamente mediante un tensor de segundo grado que puede ser expresado como un elipsoide cuyos ejes representan las tres susceptibilidades principales (ejes de susceptibilidad máximo, intermedio y mínimo ($K_1 \geq K_2 \geq K_3$)). Con independencia de la fuente de susceptibilidad magnética (minerales ferromagnéticos, paramagnéticos o diamagnéticos) se ha demostrado que la magnitud de la anisotropía depende de dos factores: de la anisotropía magnética de las partículas y de su grado de alineamiento (Tarling and Hrouda, 1993). La orientación preferente de los ejes cristalográficos determina la ASM en la mayoría de los minerales. El cuarzo y las sales se consideran isótropos desde el punto de vista magnético (Hrouda, 1986), por lo que la fábrica de ASM de las fases diamagnéticas (calcita, cuarzo y sales) sólo puede ser atribuida a la orientación cristalográfica preferente de la calcita (Ownens and Rutter, 1978).

Las medidas de la ASM se han determinado con un susceptómetro KLY-03 (AGICO). El análisis de la fábrica magnética ha incluido tanto la caracterización de la forma como la orientación de los elipsoides magnéticos y ha permitido determinar modificaciones texturales en la roca. La caracterización de la forma se ha llevado a cabo

usando la relación de P' (grado de anisotropía magnética) y T (forma de los elipsoides magnéticos). El análisis direccional se ha realizado mediante proyección estereográfica de los ejes K1, K2 y K3 (que representan las direcciones de susceptibilidad máxima, intermedia y mínima respectivamente).

Se ha trabajado con un total de 10 muestras por variedad pétrea sobre las que se han realizado mediciones de la anisotropía de susceptibilidad magnética, en tres estadios del ensayo diferentes. Estas muestras se han tallado perpendiculares a la laminación sedimentaria.

Medida 1. Medida inicial al alcanzar las probetas masa constante.

Medida 2. Tras alcanzar masa constante las probetas después de haber estado 15 días sumergidas en agua destilada.

Medida 3. Tras alcanzar masa constante las probetas después de haber estado 15 días sumergidas en una solución de sulfato de magnesio heptahidratado al 5%.

Los parámetros utilizados para describir la magnitud y forma de los elipsoides de susceptibilidad magnética en el presente trabajo han sido (Jelineck, 1981; Hrouda, 1982):

Grado de anisotropía: $P' = \exp[2(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]^{1/2}$

Donde $\eta_1 = \ln K_1$, $\eta_2 = \ln K_2$, $\eta_3 = \ln K_3$ y $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) / 3$

Forma: $T = [2 \ln(K_2 / K_3) / \ln(K_1 / K_3)] - 1$

Además de estos dos parámetros, también se ha utilizado la susceptibilidad magnética media $K_m = (K_1 + K_2 + K_3) / 3$.

III.3.9.- Medida de velocidad de propagación de ultrasonidos. UNE-EN 14146:2004.

La determinación de la velocidad de propagación de ultrasonidos, se ha realizado según las recomendaciones de la norma "Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación del módulo de elasticidad dinámico UNE-EN 14146:2004". Esta técnica no destructiva permite determinar la existencia de anisotropías en el interior de los materiales, evaluar su durabilidad y su estado de deterioro.

Este ensayo se fundamenta en la variación que experimentan las ondas elásticas (longitudinales u ondas primarias) en su tránsito a través del material. Los materiales utilizados han sido probetas cúbicas de $7 \pm 0,5$ cm de arista, sobre las que se ha medido la velocidad de propagación del sonido mediante el equipo Ultrasonic Concrete Tester C-370, que funciona por el método de transparencia. El aparato consta de dos transductores (emisor y receptor), que se han situado en superficies planas del material y colocados paralelos entre sí. Las mediciones se han realizado sobre las mismas probetas, tanto secas como saturadas, en sentido perpendicular y paralelo a la estratificación. Además, cada medición se ha repetido cinco veces para minimizar el error de medida. El espesor de las probetas se ha medido con calibres de precisión de 0,01mm.

III.3.10.- Permeabilidad.

Este ensayo se ha realizado con el objetivo de caracterizar el sistema poroso en la roca inalterada, así como las variaciones que se generan después de los procesos de cristalización de sales. Se trata de un método no destructivo y mediante el cual se puede inferir la distribución que presentan las sales en el interior de los materiales pétreos y, por lo tanto, identificar aquellas zonas que van a presentar una mayor alterabilidad potencial.

Las medidas de permeabilidad se han realizado en probetas cúbicas de 7 cm de arista, en las que se dibujó una malla regular de 1 cm de espaciado en dos caras adyacentes, realizando un total de 98 medidas en cada una de las probetas. Las medidas de permeabilidad se realizaron en puntos alternos de la malla con el objeto de reducir el efecto del gas que pudiera quedar retenido en el interior del sistema poroso como consecuencia de las medidas previas. Las medidas se realizan presionando el permeámetro contra la superficie del material, calculando la permeabilidad en milidarcis (mD) a partir de la curva de desmoronamiento de la presión por la tarjeta DAQTM en un portátil (McKinley *et al.*, 2006). Las medidas de permeabilidad terminan cuando la presión desciende de 0,5 Psi ó el tiempo del ensayo excede de 100 s (Core Laboratory Instrumets, 2001). El equipo utilizado ha sido un permeámetro de gas portátil PPP250TM (figura III-5).

De cada variedad pétrea se han tomado medidas en 5 probetas. Una de ellas corresponde a material inalterado, extraído directamente de la cantera, mientras que las 4 restantes fueron sometidas a ensayos de cristalización de sales con disoluciones al 5% y 15% de MgSO₄ y de NaCl. El ensayo de cristalización de sales ha consistido en 5 ciclos sucesivos, constando cada ciclo de dos etapas:

1 Inmersión en solución salina durante 8 horas.

2 Secado durante 20 días a temperatura y humedad constante (temperatura: 23 ±2°C y humedad relativa: 25 ±5%).

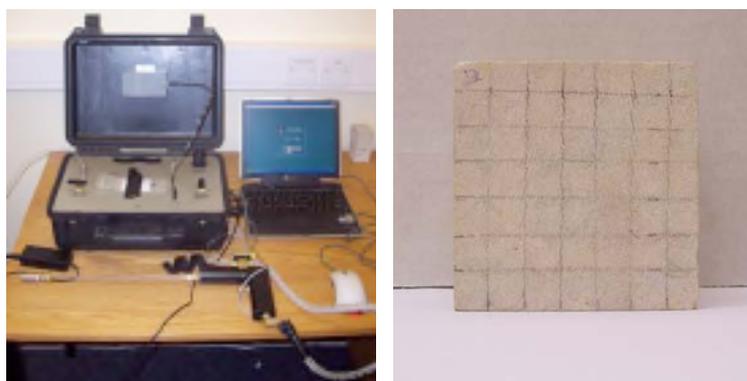


Figura III-5: Equipo utilizado para el ensayo de permeabilidad y probeta con la malla regular de 1 cm de espaciado.

III.3.11.- Colorimetría.

La determinación objetiva del color permite establecer las variaciones de color en material de cantera, así como valorar el cambio cromático de la superficie de los materiales pétreos tras la aplicación de productos de conservación.

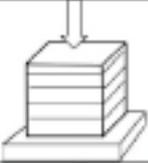
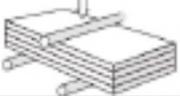
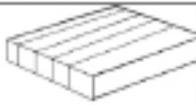
La medida del color se ha realizado en Tecnoluz (empresa Spin-off de la Universidad de Zaragoza). En este ensayo se determinan las coordenadas de color mediante la utilización del iluminante D65 (que corresponde a la luz natural con radiación ultravioleta), de temperatura de color 6500 K. Las medidas se expresan en las coordenadas L^* , a^* y b^* (L^* : representa la luminosidad del color en una escala 0 (negro) 100 (blanco), a^* : relación rojo $+a^*$ verde $-a^*$, y b^* : relación amarillo $+b^*$ azul $-b^*$). La geometría de medida ha sido de 8° difusa y observador CIE 10°.

El brillo se ha medido con geometrías de 85 °, 60° y 20°.

III.4.- Ensayos de caracterización mecánica.

En la tabla III-2 se ha realizado una síntesis de los ensayos de caracterización mecánica incluyendo la norma UNE correspondiente, las dimensiones de las probetas utilizadas en cada caso, así como las orientaciones del material con las que se han realizado los diferentes ensayos.

Tabla III-2: Ensayos de caracterización mecánica, normas, dimensiones y orientación de las probetas. (A) estratificación perpendicular al esfuerzo aplicado. (B) estratificación paralela al esfuerzo aplicado (perpendicular lado corto). (C) estratificación paralela al esfuerzo aplicado (perpendicular lado largo).

Ensayo	Norma	Tamaño probeta	A	B	C
Resistencia a la compresión uniaxial	UNE-EN 1926: 1999	7x7x7cm			
Resistencia a la flexión	UNE-EN 12372: 1999	18x6x3 cm			
Resistencia al desgaste por abrasión	UNE-EN 1341: 2002	15x12x2,5 cm			
Resistencia al desgaste por rozamiento	UNE 22183:85	7x7x7 cm			
Resistencia al deslizamiento sin pulimento	UNE-EN 1341: 2002	15x12x2,5 cm			
Resistencia al Choque	UNE 22-189-85	20x20x3 cm			
Microdureza Knoop	UNE 22-188-85	12x5x1 cm			
Planeidad	UNE-EN 13373 2003	lajas			

III.4.1.- Resistencia a la compresión uniaxial. UNE-EN 1926:1999.

El ensayo se ha realizado según el procedimiento descrito en la norma “Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial UNE-EN 1926:1999”.

Los datos obtenidos mediante este ensayo nos marcan la carga máxima por unidad de superficie que puede soportar el material antes de su rotura. Este dato se determina para valorar los posibles usos del material en función de los requerimientos específicos de cada uso, siendo de especial interés para aquellos productos de piedra natural que están sometidos a esfuerzos portantes o de compresión.

El ensayo se ha realizado en el Laboratorio Central para la Calidad de la Edificación (LACE) mediante la utilización de la prensa Ibertest de 150 Tn, con un equipo electrónico acoplado Sce M-4214.

III.4.2.- Resistencia a la flexión antes y después de heladicidad. UNE-EN 12372:1999.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada. UNE-EN 12372:1999” antes y después de someter las probetas a ciclos de hielo-deshielo.

El ensayo de resistencia a flexión antes de heladicidad aporta información sobre la capacidad de resistencia del material para deformarse antes de su rotura. Este ensayo es necesario para valorar la idoneidad de un material para su uso como pavimento, peldaños de escalera y revestimiento.

Por su parte, el ensayo de resistencia a la flexión después de someter las probetas al ensayo previo de heladicidad indica la variación de esta propiedad como consecuencia de la exposición de la piedra a ciclos de hielo-deshielo. En función de la variación en la resistencia del material se puede determinar la idoneidad de uso en exteriores en zonas húmedas donde la temperatura puede ser inferior a 0 °C. Este aspecto tiene especial importancia por el riesgo de la aparición de discontinuidades e incluso de la fractura del material como consecuencia del aumento de volumen del 9% con el paso de agua a hielo.

Estos ensayos se han realizado en el Laboratorio Central para la Calidad de la Edificación (LACE) mediante la prensa controls, Multiensayo, célula de carga PCI y la cámara frigorífica con circulación de aire DYCOMETAL, modelo CHD-525.

En todas las rocas, un número suficiente de ciclos de hielo-deshielo producirá con el tiempo un deterioro en el material y la disminución de sus propiedades mecánicas por lo que es necesario evaluar la resistencia mecánica tras heladicidad, teniendo presente el número de ciclos reales que puede tener que soportar el material tras su puesta en obra y no los 48 ciclos que contempla la norma actual.

III.4.3.- Resistencia al desgaste por abrasión. UNE-EN 1341:2002.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo. Resistencia al desgaste por abrasión UNE-EN 1341:2002.”

Por medio de este ensayo se evalúa el desgaste por abrasión que puede sufrir una roca como consecuencia de su uso rutinario y se puede estimar la adecuación de uso de la misma como material para pavimentación, en función de las condiciones previstas de circulación de personas y/o vehículos en la zona a pavimentar. La mayor o menor resistencia al desgaste por abrasión de un material pétreo dependerá en mayor medida de las características intrínsecas del propio material como pueden ser cohesión, grado de alteración de los minerales, dureza y posibles anisotropías.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de geotecnia Proyex sobre probetas con acabado superficial corte de sierra.

III.4.4.- Desgaste por rozamiento en plataforma giratoria. UNE 22183:85.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Mármoles y calizas ornamentales. Resistencia al desgaste por rozamiento UNE 22-183-85”.

Los ensayos de abrasión miden el deterioro por rozamiento que se ejerce en la superficie del material. Al igual que en el ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, este ensayo permite estimar la adecuación de uso del material para pavimentación, en función de las condiciones previstas de circulación de personas y/o vehículos de la zona a pavimentar.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de geotecnia Proyex sobre probetas con acabado superficial corte de sierra.

III.4.5.- Resistencia al deslizamiento sin pulimento. UNE-EN 1341:2002.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo. Resistencia al deslizamiento sin pulimento UNE-EN 1341: 2002”.

Mediante este ensayo se caracteriza la resistencia al derrapaje de un suelo y permite valorar la calidad de la roca para su uso en pavimentos tanto exteriores como interiores, evaluando el rozamiento superficial con el fin de conseguir superficies no deslizantes. Existe un índice umbral que es necesario superar para tener esta aptitud en función de la adherencia requerida. La principal limitación de este ensayo es que no informa sobre la adherencia del material después de un periodo prolongado de uso.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de geotecnia Proyex sobre probetas con acabado superficial corte de sierra.

III.4.6.- Resistencia al Choque. UNE 22-189-85.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Mármoles y calizas ornamentales. Resistencia al choque UNE 22-189-85”.

Este ensayo permite evaluar la resistencia a la rotura de un material ante el efecto de la caída de un peso vertical. Esta resistencia permite estimar la calidad del material para su uso en pavimentos (donde son frecuentes los impactos y golpes) y fachadas (donde son posibles los golpes debidos al empleo de góndolas de limpieza).

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de geotecnia Control-7.

III.4.7.- Microdureza Knoop. UNE 22-188-85.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Mármoles y calizas ornamentales. Microdureza Knoop UNE 22-188-85”.

En este ensayo se realiza una medida de la dureza superficial de la roca y aporta información sobre la durabilidad del pulido y la cohesión superficial de los materiales pétreos. En el valor de este parámetro, además de la cohesión de la roca influye la dureza de los minerales, por ello los resultados obtenidos son solo estrictamente comparables entre rocas de semejante composición mineralógica.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de geotecnia Control-7.

III.4.8.- Planeidad. Norma UNE-EN 13373:2003.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de las características geométricas de las unidades. Norma UNE-EN 13373 2003”.

Este ensayo proporciona una medida cuantitativa de la desviación que, respecto a una superficie plana, tiene la superficie de una baldosa cortada o de una losa de piedra con lajado natural y permite caracterizar el aspecto final que presentará tras su puesta en obra.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de geotecnia Entecsa.

III.4.9.- Dureza superficial Shore D. ASTM D 2240.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma ASTM D 2240 "Standard Test Methods for rubber property-durometer hardness".

Esta técnica permite obtener una medida relativa de la dureza superficial de la roca para poder evaluar la variación de las propiedades mecánicas del material tras la aplicación de productos de conservación en los materiales pétreos realizando medidas antes y después de la aplicación de dichos productos.

El equipo empleado ha sido un microdurómetro Shore-D, que presenta una escala arbitraria comprendida entre 0 y 100 que mide la resistencia a la penetración de una punta cónica. Para realizar el ensayo, la base compresora del microdurómetro se coloca sobre las caras a medir y se ejerce presión de forma perpendicular a la cara.

El ensayo se ha realizado sobre probetas cúbicas de 5 cm de arista en tandas de 3 muestras por cada consolidante y forma de aplicación, orientando las probetas con la estratificación perpendicular a la dirección de aplicación del esfuerzo. En todos los casos la medida de la dureza superficial se ha realizado sobre las mismas probetas antes y después de la consolidación a temperatura y humedad ambiental. Para evitar errores por la heterogeneidad composicional se dibujo una malla regular de 50 puntos en cada una de las caras ensayadas tomando la precaución de que los puntos de medida estuvieran distanciados un mínimo de 5 mm del borde de la probeta.

III.5.- Ensayos de durabilidad.

III.5.1.- Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales. UNE-EN 12370:1999.

Este ensayo se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales. UNE-EN 12370:1999”.

El ensayo de cristalización de sales es un ensayo de envejecimiento artificial acelerado, en el que se trata de reproducir, en un corto periodo de tiempo, el deterioro que puede sufrir la piedra natural a lo largo de su vida útil por la cristalización de sales en el interior de su sistema poroso (Dearman, 1982; Martín *et al.*, 1992; Rivas *et al.*, 1998). Se ha evaluado la durabilidad tanto de la roca fresca como de la roca tratada con diferentes tratamientos de conservación con el objeto de valorar tanto las aptitudes de cada material para su uso en zonas potencialmente favorables para desarrollar esta patología como la de estos tratamientos de conservación destinados a paliar la alteración en los materiales pétreos.

La principal limitación de este tipo de ensayos es la representatividad de los resultados obtenidos, ya que en la naturaleza tienen lugar varios procesos de deterioro de forma simultánea (cristalización de sales, heladicidad, humectación-secado, etc.).

CAPÍTULO IV.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

CAPÍTULO IV.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

IV.1.- Introducción.

En este capítulo se realiza una breve síntesis de las principales características geológicas de Aragón utilizada como marco para la situación de cada una de las 31 zonas en las que se localizan las canteras en las que se explotan las 40 variedades pétreas caracterizadas. En la tabla IV-1, se presenta un cuadro resumen en el que se incluyen para las 40 variedades pétreas caracterizadas, la unidad geológica en la que se ubican, su número y sigla de identificación, edad, formación geológica a la pertenecen y el número de variedades explotadas. En la tabla IV-2 se exponen los nombres científicos, los nombres comerciales y localidades donde se ubican las explotaciones.

La Comunidad Autónoma de Aragón posee una superficie de 47.669 Km², situada en el cuadrante nordeste de España (figura IV-1), limita al Norte con Francia; al Sur con las provincias de Valencia y Cuenca; al Este con las de Castellón, Lérida y Tarragona; y al Oeste con las de Navarra, La Rioja, Soria, Guadalajara y Cuenca.

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.

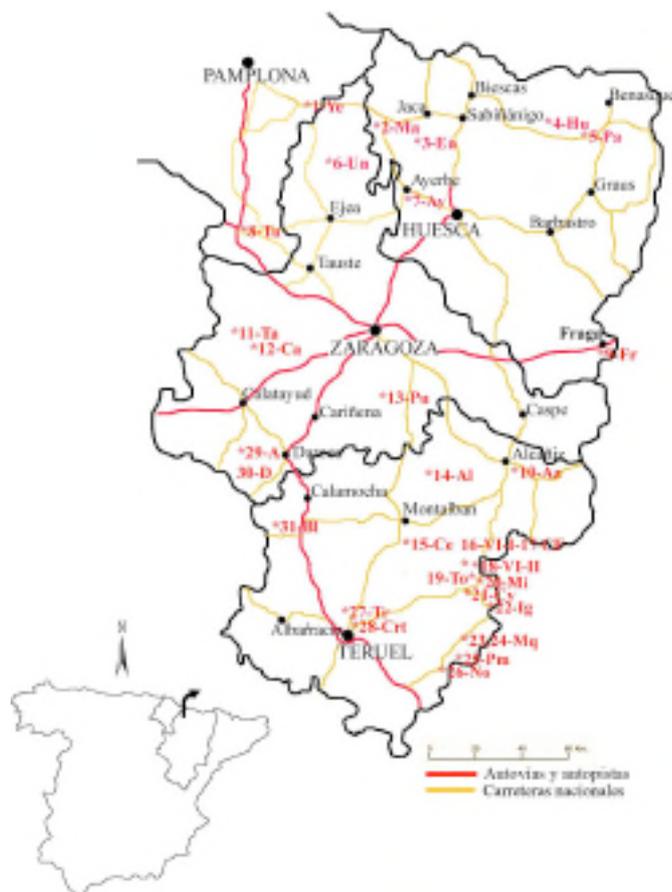


Figura IV-1: Mapa de situación geográfica con la ubicación de las explotaciones caracterizadas.

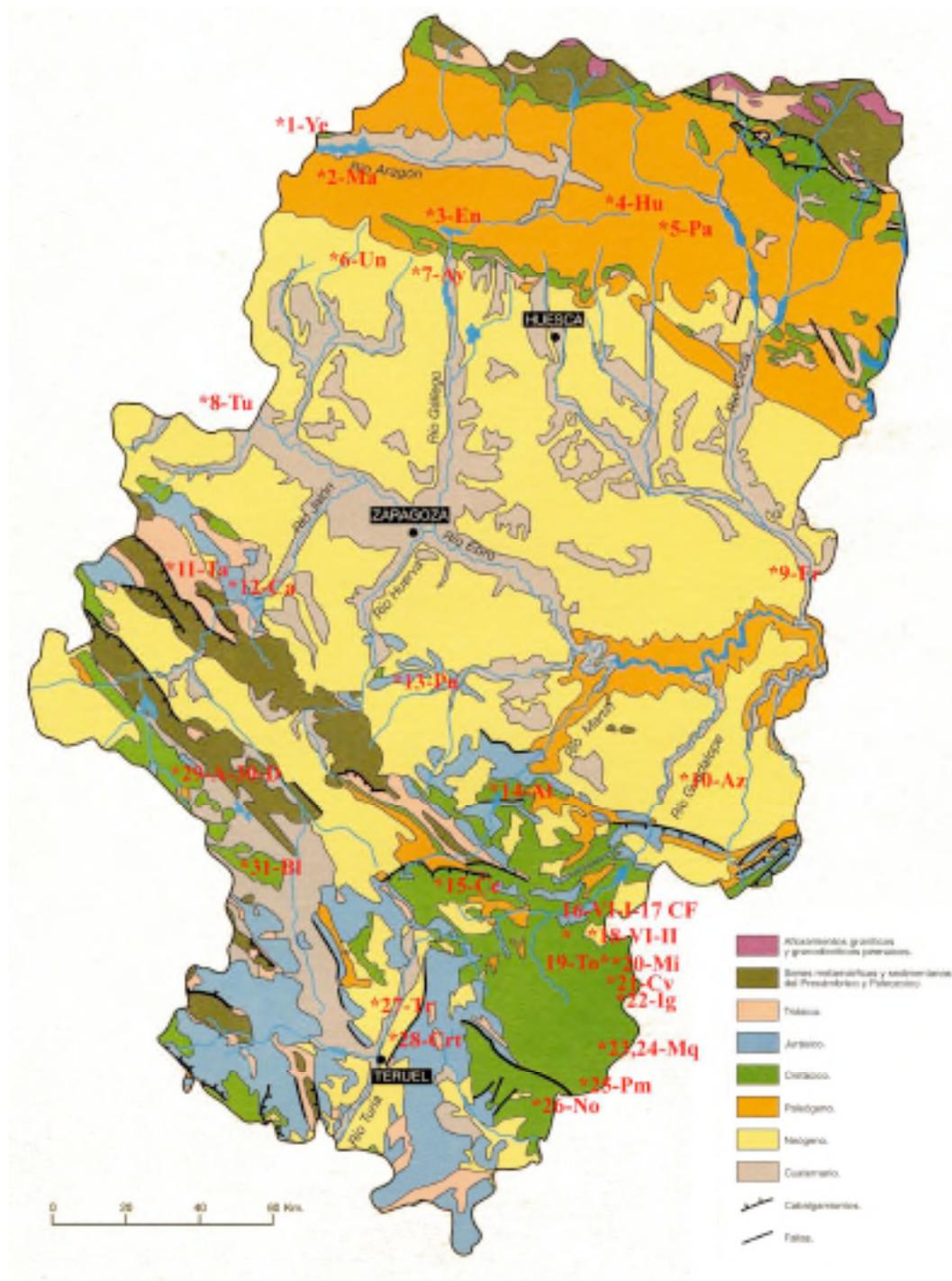


Figura IV-2: Mapa geológico de Aragón con la ubicación de las explotaciones caracterizadas (Modificado de Peña Monné, 1995).

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-Turoliense)	Torrente Cinca-Alcolea del Pinar	1		
	10- Az	Mioceno (Aquitaniense)	Fm. Caspe	1		
Cordillera Ibérica	Rama Aragonesa	11- Ta	Triásico Inferior	Facies Buntsandstein	1	
		12- Ca	Jurásico Medio (Bathonense)	Fm. Chelva	3	
		13- Pu	Jurásico Superior (Titónico)	Fm. Higuieruelas	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 (Turoliense)	Calizas y margas Turolienses	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- Bl	Cretácico sup.(Turoniense-Coniaciense)		Fm. Barranco de los Degollados	3		

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	Biomicrocita Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Cabanillas
9-Fr	Biomicrocita Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Fraga
12-Ca1	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
Ca2	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
Ca3	Biopelmicrocita-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Calatorao
13-Pu	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Amarillo Puebla	Puebla de Albortón
14-Al	Biomicrocita-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 Villores	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	Biomicrocita-Packstone bioclástico	Fósil Blanca, Fósil Amarilla, Gris Raíces	Mosqueruela
24-Mq-21	Pelmicrocita-Wackstone de peloides y bioclastos	Ciega Blanca	Mosqueruela
Mq-22	Biomicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Ciega Gris	Mosqueruela
Mq-23	Biopelmicrocita- Wackstone de bioclastos y peloides	Gris Verde Monte	Mosqueruela
Mq-24	Biopelmicrocita- Wackstone de bioclastos y peloides	Blanca Paja	Mosqueruela
25- Pm	Biomicrocita-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	Biomicrocita-Wackstone bioclástico	Crema Teruel	Tortajada
29- A	Biopelmicrocita-Wackstone de bioclastos y peloides	Abanto Primera	Abanto
30 -D	Sparstone	Abanto Comercial	Abanto
31- B11	Dolosparstone	Blancas Crema	Blancas
B12	Dolosparstone	Blancas Jaspe	Blancas
B13	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 norpirenaico (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 metamorfizada.

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 cobertura 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 deltaicas) 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 medio-ambiental.

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 progresa 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 antepaíses Surpirenaica que terminó de configurarse durante el Oligoceno superior-Mioceno inferior debido al emplazamiento de la lámina del Guarga (Camara y Klimowitz, 1985), pasando la anterior cuenca de antepaíses (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 monoclinal. 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, Sigüenza, Barbastro, Monzón, Fraga y Lérida.
- La Suroccidental, que abarcaría la región delimitada por las localidades de Tarazona, Azuara, Escatrón, Caspe, Fabara y Alcañiz.

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).

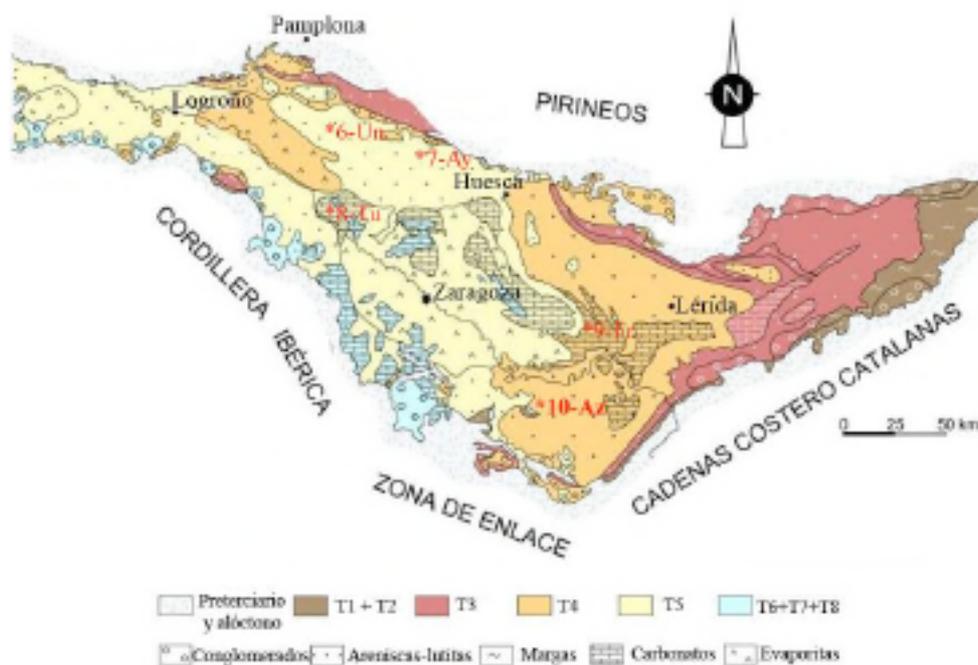


Figura IV-4: Mapa geológico de la Depresión Central con la ubicación de las explotaciones (modificado de Alonso-Zarza *et al.*, 2002).

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 paso 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 glacialismo 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 Cordillera Ibérica, pero presenta en el entorno de la Puebla de Albortón 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 sí 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 lasjas 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 Albortón (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 Villarluengo (18-VI-II). Los materiales cretácicos tableados del Maestrazgo se explotan principalmente como lasjas 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 lasjas:

- Alacón (14-Al): formación Alacón, edad Barremiense-Aptiense.
- Nogueruelas (26-No), Iglesiasuela (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 Villarluengo (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 Villarluengo (16-VI-I y 17-CF) pertenecientes a la formación Órganos de Montoro.

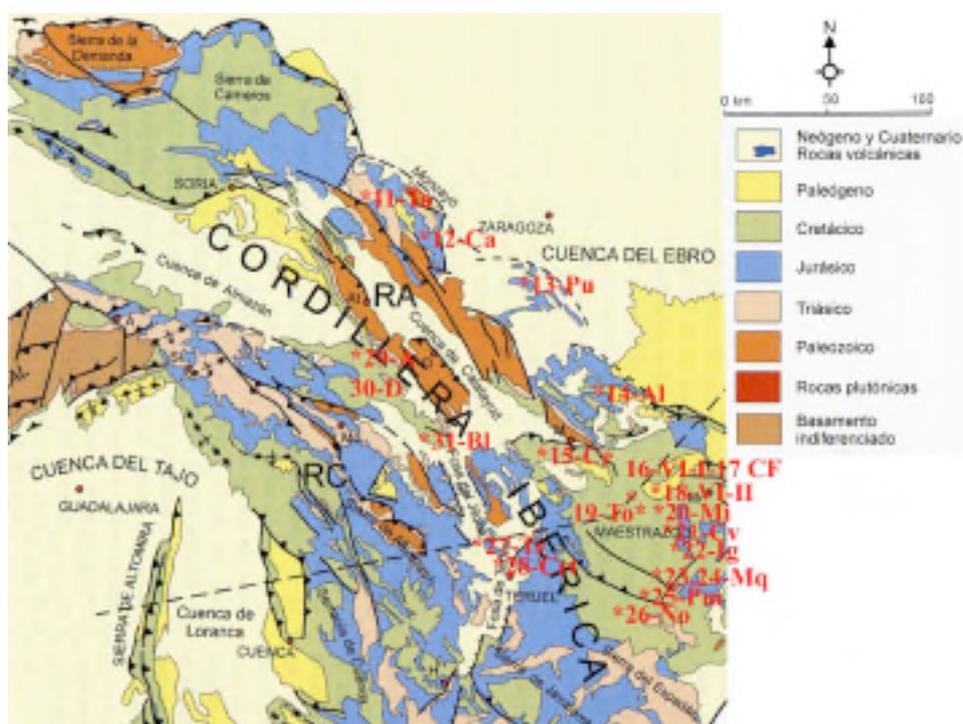


Figura IV-5: Mapa geológico de la Cordillera Ibérica con la ubicación de las explotaciones (modificado de Vera *et al.*, 2004). RA (Rama Aragonesa), RC (Rama Castellana).

IV. 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	EPOCA	PISO
Eozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Versiniense
			Pleistoceno	Californiense
		Neógeno	Plioceno	Placenzense
				Zancliyense
				Vincero
			Mioceno	Toroniense
				Schwallense
				Larghiense
		Paleógeno	Oligoceno	Burdigaliense → 9 r, 5 Hu, 7 Ag
				Acquiniense → 10 Az, 8 Tr
			Eoceno	Chitense
				Rupeliense
		Priderense → 1 Ye		
		Bartoniense → 3 Iv, 2 Ma		
		Paleoceno	Lutociense	
			Yperciense → 4 Hu, 5 Pa	
		Cretácico	Superior	Therapsidense
				Dumense
				Maastrichtense
				Campanense
				Santonense
				Coniacense → 39 A, 30 D, 31 B1
				Turonense
			Inferior	Cenomanense → 16 VI-I, 17 CF
				Aptiense → 15 Ca, 19 r, 21 Mg 1, 24 Mg 2, 25 Pr
				→ 21 Cv, 22 Ig, 25 No
				Aptiense → 20 Mi
				Bartoniense → 14 Al
				Hauteriviense
				Valanginiense
		Berásense		
		Jurásico	Superior	Tithonense → 13 Pu
				Kimmeridgiense
			Medio	Oxfordense
				Callovense
				Baherense → 12 Ci
				Bajocense
		Inferior	Aalenense	
			Turonense	
		Triásico	Tías	Platystrochiense
Sinemuriense				
Superior	Hettangense			
	Norianense			
	Carniense			
	Medio		Ladinense	
			Anisienense	
	Inferior		Seyriense → 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.



A



A'

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 banquadora y la extracción de los bloques con retroexcavadora.



A



A'

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 sinclinatorio 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 Cáседа. 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.



A



A'

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

Nombre Científico: Sedarenita

Sigla: 5-Pa

Nombre Científico: Filarenita

Edad: Eoceno (Cuisiense - Luteciense)

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.



A



A'

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).



B



B'

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 interstratificados con materiales lutíticos.

a) Estratos arenosos de espesor inferior a 0,7 metros que, junto a las lutitas asociadas corresponden a las facies de llanura de inundación.

b) 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.

c) 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.



A



A'



B



B'

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 ocres 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.



A



A'

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-Turolense)

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.



A



A'

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.



A



A'

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 Tabuena se explota en la cantera "Coscollar" ubicada en el término municipal de Tabuena (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 Tabuena 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 Tabuena 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.

**A****A'**

Figura A- Aspecto general de la explotación de la arenisca de Tabuena.

Figura A´- Palés de lajas de arenisca de Tabuena 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.



A



A'

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 Albortón (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 Albortón, 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.



A



A'

Figura A- Aspecto general de la explotación de La Puebla de Albortón.

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

Sigla: 14-A1

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.



A



A'

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 Villarluengo (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 *Praealveolina* 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.



A



A'

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 pseudomorfo 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.



A



A'

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 Villarluengo (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.

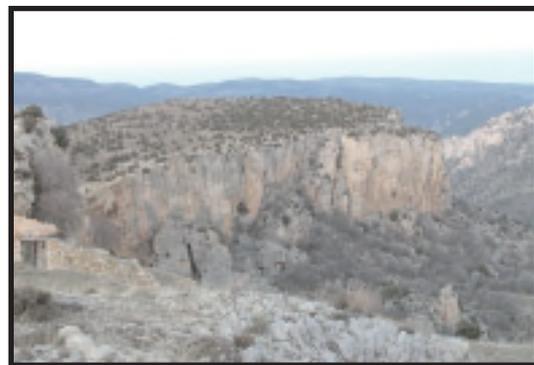
Situación geológica y Características de la explotación

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.



A



A'

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.



A



A'

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.



A



A'

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



B



B'

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 Llorens, 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.



A



A'

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.



A



A'

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.



A



A'

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-B1

Nombre científico: Dolosparstone

Edad: Cretácico superior (Turonense - Coniacense)

Formación: Barranco de los Degollados

Situación geográfica

Las variedades Blancas Crema (31-B11), Blancas Jaspe (B12) y Blancas Moka (B13) 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.



A



A'

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.

CAPÍTULO V.- CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA

CAPÍTULO 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 esta 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.

$$v = s / X$$

- 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), feldespatos (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%.

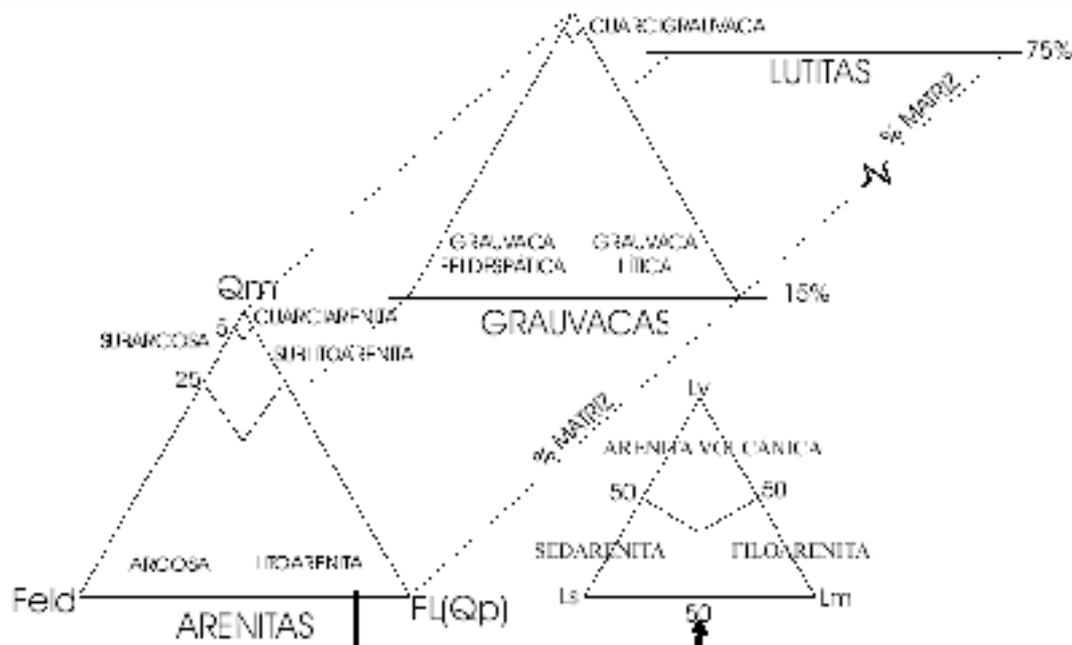


Figura V-1: Clasificación de las arenitas (tomada de Pettijohn et al., 1987).

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 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).

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	Dolomias			
		Cemento esparítico		Matriz micrítica			De 1 a 10% de aloquímicos	Menos del 1%	Con "sombras" o "fantasmas" de aloquímicos	Sin sombras
		TIPO I	TIPO II						DOLOMIAS	
Más del 25% de INTRACLASTOS	Menos del 25% de COIDES (relación de volúmenes de peloides y bioclastos b/p)	INTRAESPARITA	INTRAMICRITA	Según el aloquímico dominante	MICRITA	BIOLITO	Según el aloquímico dominante	Dolomía con Intraclastos	DOLOMIAS	
		INTRAESPARRUDITA	INTRAMICRORRUDITA					MICRITA con Intraclastos		
		OOESPARITA	OOMICRITA					MICRITA con Ooides		
		OOESPARUDITA	OOMICRORRUDITA					MICRITA con Bioclastos		
Menos del 25% de INTRACLASTOS	Más del 25% de COIDES	BIOESPARITA	BIOMICRITA	MICRITA con Peloides	MICRITA	BIOLITO	Según el aloquímico dominante	Dolomía con Ooides	DOLOMIAS	
		BIOESPARUDITA	BIOMICRORRUDITA					MICRITA con Peloides		
Menos del 25% de INTRACLASTOS	Menos del 25% de COIDES	BIOPELESPARITA	BIOPELMICRITA					Dolomía con Bioclastos		
		PELESPARITA	PELMICRITA					Dolomía con Peloides		

Figura V-2: Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Folk, 1962).

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

Figura V-3: Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Dunham, 1962).

MEDIO DE DEPÓSITO		ACTIVIDAD BIOLÓGICA			DIAGÉNESIS						
Sostenida por la matriz		Granosostenida		Organismos in situ			No obliterante		Obliterante		
<10% granos	>10% granos	Con matriz	Con conchó	Organismos apertalados	Organismos incrustantes	Edificios orgánicos rígidos	Componente fundamental cemento	Contactos planos entre los granos	Contactos angulosos entre los granos	Mosaico de cristales	
Calcineudstone	Wackstone	Packstone	Grainstone	Bafflestone	Boundstone	Framestone	Cementstone	Grainstone conchoidal	Grainstone subarado	Spangstone (>10µm)	Dolopangstone (>15µm)
	Floestone	Radstone con matriz	Radstone con conchó	(rudista)	(aptes algas)	(corales)				Micro-spangstone (<10µm)	Dolomicro-spangstone (<15µm)
Granos > 2mm											

Figura V-4: Clasificación de las rocas carbonatadas (tomada de Wright, 1992).

Nomenclatura comercial

La clasificación comercial presentada corresponde al nombre con el que las industrias 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-B11, 31-B12, 31-B13.	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.

	<i>Roca Ornamental</i>	<i>Piedra de Cantería</i>	<i>Lajas</i>
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 Tabuena	Lajas
Rocas carbonatadas			
8-Tu	Biomicrocristal-Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Cantería
9-Fr	Biomicrocristal-Wackstone bioclástico	Piedra Campanil	Cantería
12-Ca1	Biopelmicrocristal-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Ornamental
Ca2	Biopelmicrocristal-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Ornamental
Ca3	Biopelmicrocristal-Packstone de peloides y pelecípodos	Mármol Negro Calatorao	Ornamental
13-Pu	Biopelmicrocristal-Wackstone de bioclastos y peloides	Amarillo Puebla	Ornamental
14-Al	Biomicrocristal-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 Villosos	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	Biomicrocristal-Packstone bioclástico	Fósil blanca, Fósil Amarilla, Gris Raíces	Cantería-lajas
24-Mq-21	Pelmicrocristal-Wackstone de peloides y bioclastos	Ciega Blanca	Cantería-lajas
Mq-22	Biomicrocristal-Wackstone de bioclastos y peloides	Ciega Gris	Cantería-lajas
Mq-23	Biopelmicrocristal-Wackstone de bioclastos y peloides	Gris Verde Monte	Cantería-lajas
Mq-24	Biopelmicrocristal-Wackstone de bioclastos y peloides	Blanca Paja	Cantería-lajas
25-Pm	Biomicrocristal-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	Biomicrocristal-Wackstone bioclástico	Crema Teruel	Ornamental
29-A	Biopelmicrocristal-Wackstone de bioclastos y peloides	Abanto Primera	Ornamental
30-D	Sparstone	Abanto Comercial	Ornamental
31-B11	Dolosparstone	Blancas Crema	Ornamental
B12	Dolosparstone	Blancas Jaspe	Ornamental
B13	Dolosparstone	Blancas Moka	Ornamental

Sigla: 1-Ye

Nombre Científico: Sedarenita

Nombre Comercial: Piedra de Yesa

Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

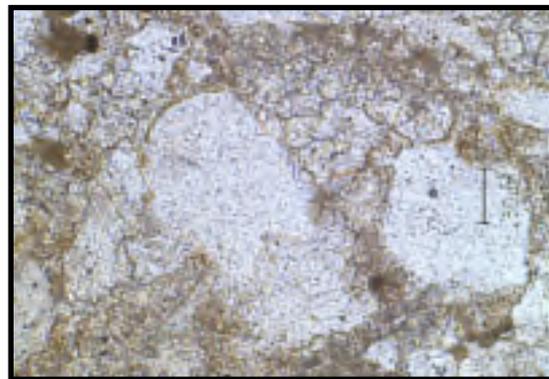
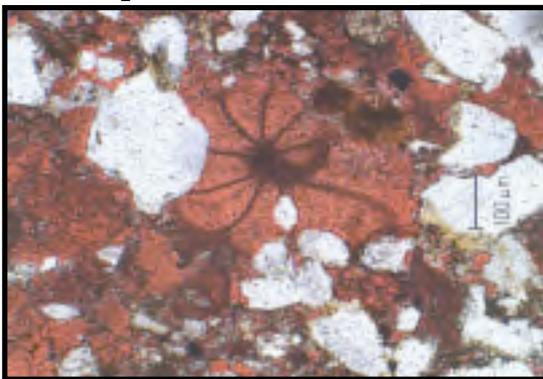
Petrográficamente, la “Piedra de Yesa” se describe como una arenita, clasificada como Litoarenita-Sedarenita (Pettijohn, 1987) de textura granosostenida. El esqueleto 64% está compuesto por fragmentos de roca 34,3%, clastos de cuarzo 26,2% de tamaño medio 0,25 mm y feldespatos alterados 3,5%. Dentro 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.

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.

Nícoles paralelos

A

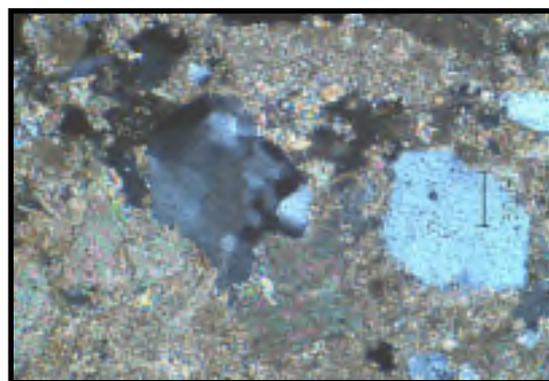
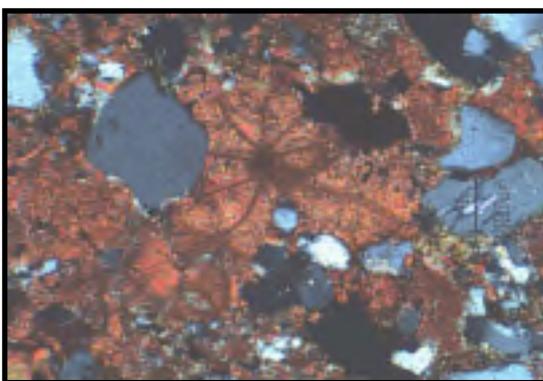
B



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.

Sigla: 1-Ye**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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
Sigla: 1-Ye			
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	A	147,5Mpa	11,63Mpa
 B			
Resistencia a la flexión			
 A	A	28,30Mpa	1,05Mpa
 B			
 C			

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%).

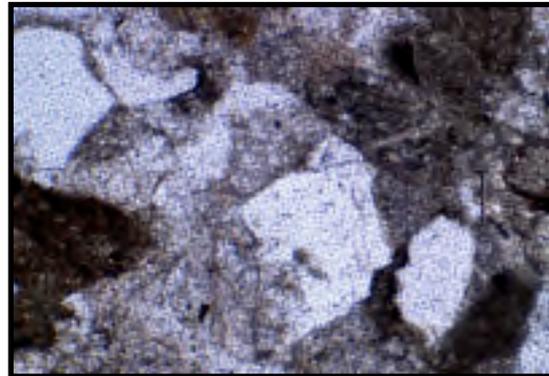
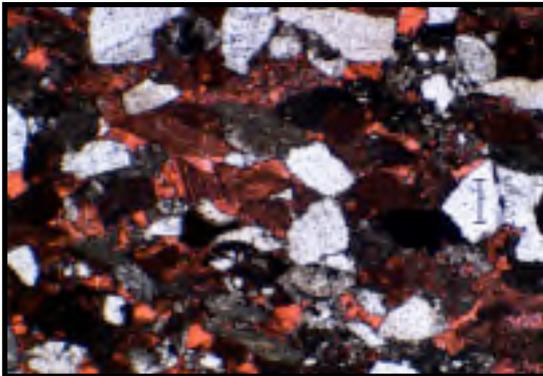
El cemento es calcítico esparítico intergranular 9% de tamaño medio 0,35 mm recreciendo a las partículas carbonatadas con continuidad cristalina, calcítico esparítico rellenando grietas de extensión 2,2% y dolomítico sintaxial 1%. Aparece una proporción significativa de matriz filosilicatada 4,5%. De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

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 ($S_o=1,7$).

Nícoles paralelos

A

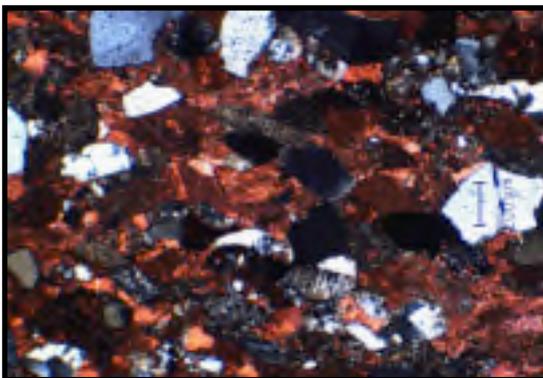
B



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.

Sigla: 2-Ma

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
Sigla: 2-Ma			
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 al deslizamiento	68	1,58	0,02
Resistencia a la compresión			
 A	A 96Mpa	2,27Mpa	0,05
 B			
Resistencia a la flexión			
 A	A 22,1Mpa	0,79Mpa	0,09
 B	Tras heladicidad A	0,59Mpa	0,08
 C			
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%, feldespatos 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.

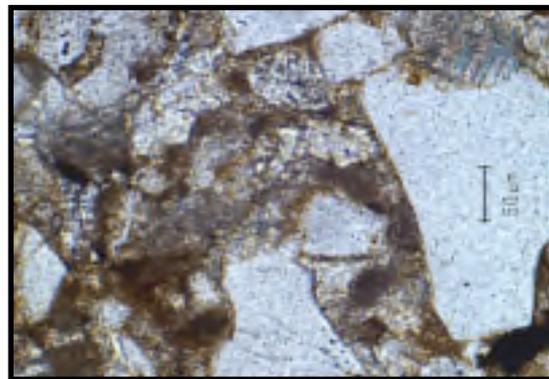
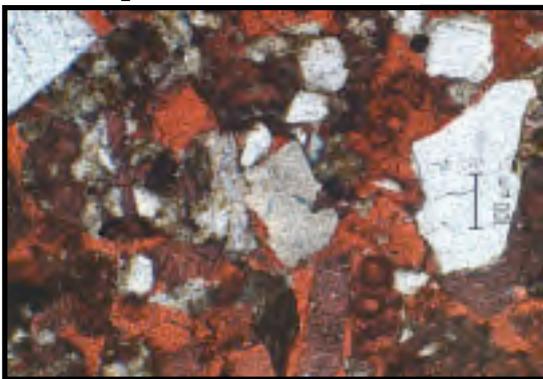
El cemento es calcítico esparítico intergranular en mosaico inequigranular y sintaxial 9% con contactos curvos y tamaño medio 0,1 mm. La matriz filosilicatada es escasa <1%.

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 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 ($S_o=1,2-1,4$).

Nícoles paralelos

A

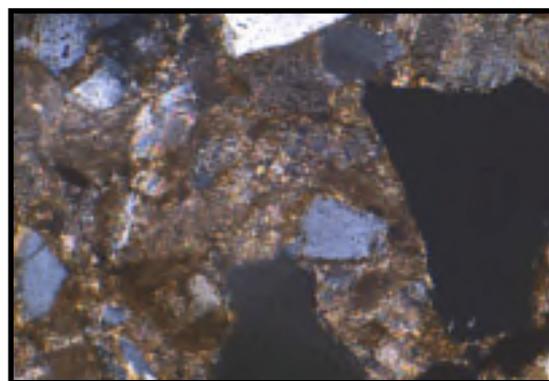
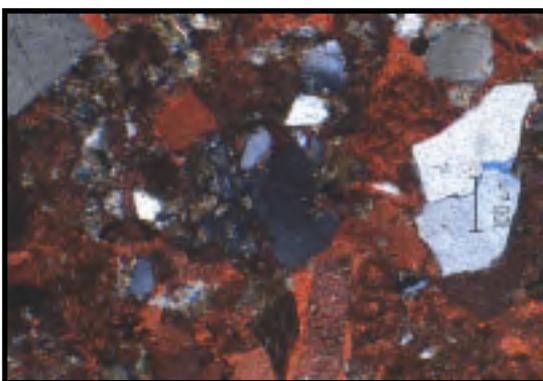
B



Nícoles cruzados

A'

B'

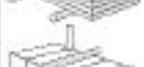


A-A' (x10) Aspecto general, zona teñida. Clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos cementados por calcita esparítica. Escala 100 micras.

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

Sigla: 3-En**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
Sigla: 3-En				
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%).

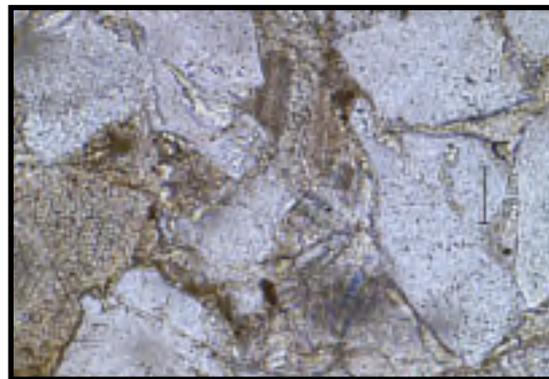
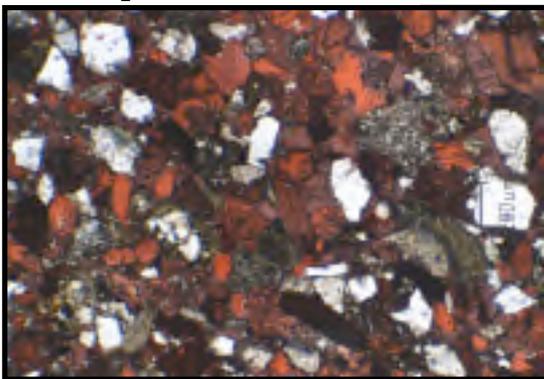
El cemento 18% es calcítico esparítico en ocasiones de calcita ferrosa con un tamaño medio de 0,25 mm y contactos irregulares. En una proporción del 1% hay cementos sintaxiales de cuarzo que interpretamos en todos los casos como heredados. La matriz es inferior al 2% y el espacio poroso es inferior al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

Nícoles paralelos

A

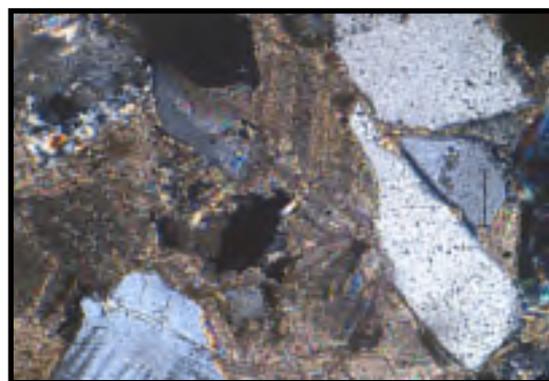
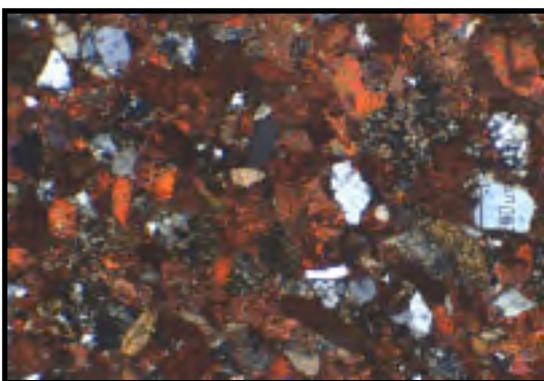
B



Nícoles cruzados

A'

B'

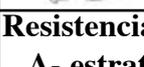
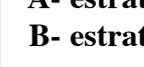


A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Se diferencian clastos de cuarzo monocristalinos y policristalinos y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos.

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

Sigla: 4-Hu**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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
Sigla: 4-Hu				
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
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
 A	Tras heladicidad A	25,49Mpa	1,51Mpa	0,06
 B	Tras heladicidad B	27,03Mpa	0,95Mpa	0,04
 C	Tras heladicidad C	24,34Mpa	3,67Mpa	0,15
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.

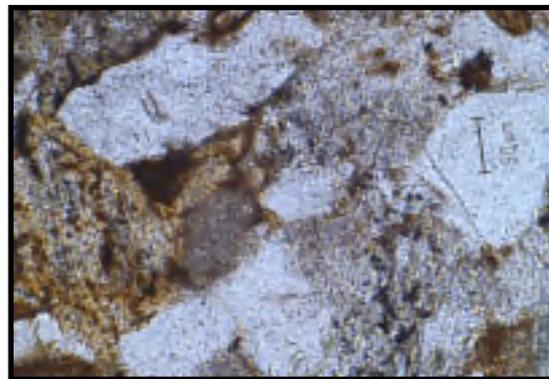
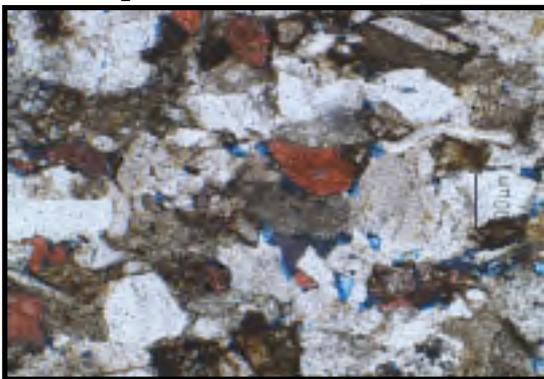
El cemento esparítico 4,4% presenta un tamaño medio de 0,1 mm, es de calcita ferrosa (95%) y accesoriamente de dolomía ferrosa (5%). Aparece una proporción significativa 6,3% de matriz filosilicatada secundaria, generada a partir de la alteración de los feldespatos y filosilicatos. Como minerales de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

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.

Nícoles paralelos

A

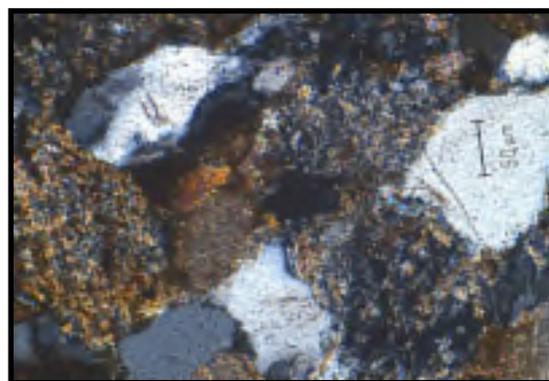
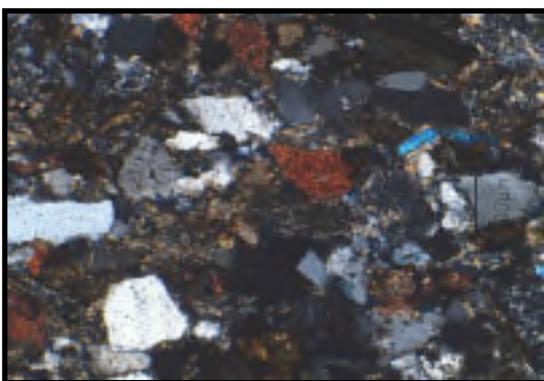
B



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.

Sigla: 5-Pa**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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
Sigla: 5-Pa				
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	B	27,48Mpa	0,91Mpa	0,03
 C	C	29,51Mpa	1,05Mpa	0,03
				0,09
	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
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: Calclitita

Nombre Comercial: Piedra de Uncastillo

Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra de Uncastillo” se describe como una arenita, clasificada como Calclitita (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 feldespatos 2,1% tamaño medio 0,18 mm, con diferentes estados de alteración. Como accesorios se encuentran óxidos de hierro, moscovita y fragmentos de rocas lutíticas. 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.

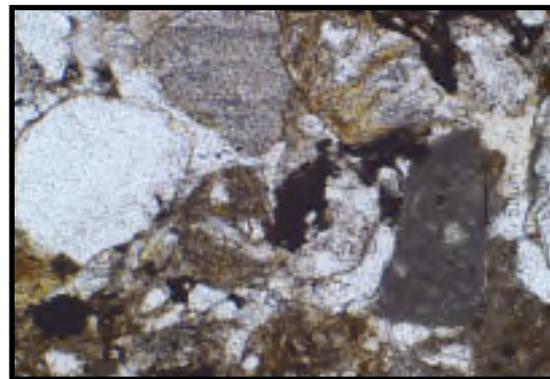
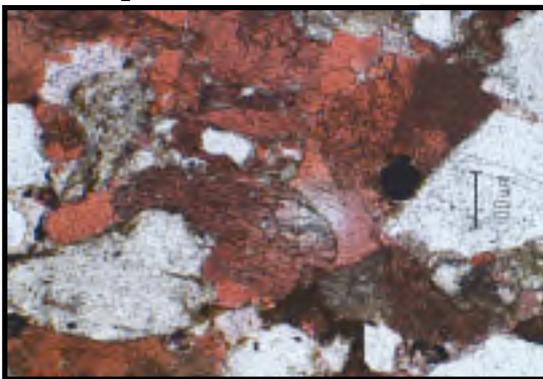
El cemento 19% es mayoritariamente de calcita esparítica intergranular y sintaxial (90%) tamaño medio 0,16 mm y en menor proporción de cuarzo sintaxial (10%) con contactos predominantemente curvos. La matriz filosilicatada se presenta con porcentajes en torno al 2%. La porosidad abierta es del 10%.

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.

Nícoles paralelos

A

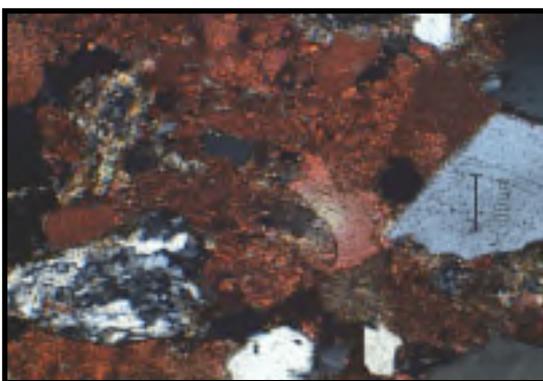
B



Nícoles cruzados

A'

B'

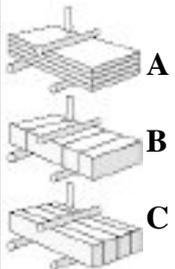


A-A' (x10) Aspecto general, zona teñida. Clastos de cuarzo y fragmentos líticos carbonatados y metamórficos cementados por calcita esparítica. Escala 100 micras.

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

Sigla: 6-Un**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	
Sigla: 6-Un					
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	43,33Mpa	11,40Mpa	0,08	1,00
	B	43,29Mpa	30,12Mpa	0,22	
Resistencia a la flexión					
	A	3,24Mpa	0,46Mpa	0,14	0,07
	B	3,10Mpa	0,26Mpa	0,08	
	C	3,01Mpa	0,19Mpa	0,06	
	Tras heladicidad A	3,88Mpa	1,96Mpa	0,50	0,38
	Tras heladicidad B	3,41Mpa	0,36Mpa	0,11	
	Tras heladicidad C	4,97Mpa	0,27Mpa	0,05	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	31,5mm	4,22mm	0,13	1,40	
B- estratificación paralela	22,5mm	8,51mm	0,37		
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 feldespatos 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.

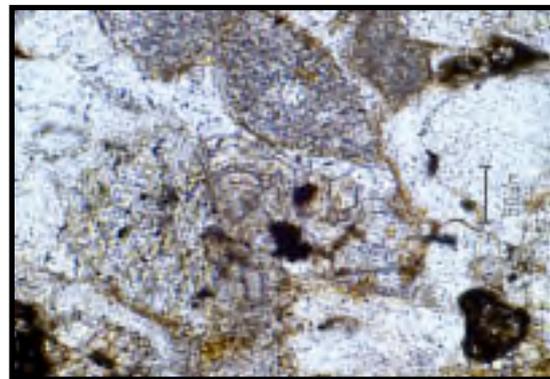
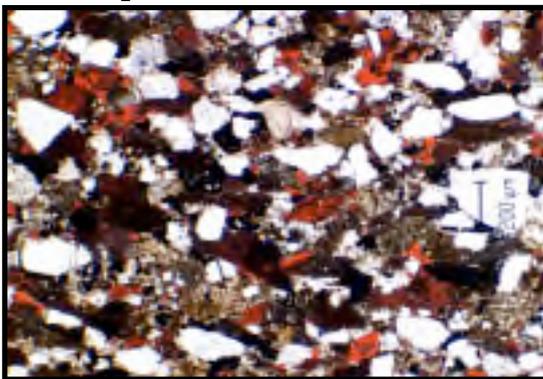
La matriz, compuesta por filosilicatos, es poco abundante 1-3 %, la porosidad abierta está distribuida homogéneamente en la roca y supone un 9% del volumen total de la roca y por último el cemento alcanza un 21% es carbonatado (95%) y de cuarzo sintaxial (5%) con un tamaño medio de 0,16 mm. El cemento 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.

Nícoles paralelos

A

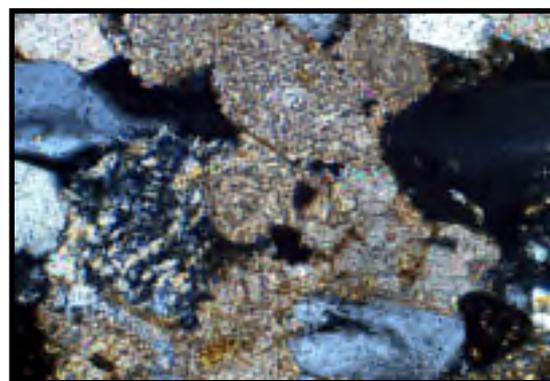
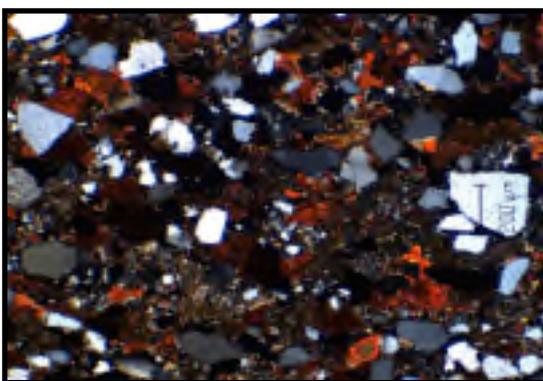
B



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.

Sigla: 7-Ay

Descripción de Visu:

Macrosópicamente 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 macrofósiles.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Sigla: 7-Ay					
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  B	A	40,6Mpa	15,59Mpa	0,12	1,31
	B	31,1Mpa	9,15Mpa	0,09	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	4,90Mpa	0,58Mpa	0,12	0,16
	B	4,21Mpa	0,88Mpa	0,21	
	C	4,95Mpa	0,40Mpa	0,08	
	Tras heladicidad A	6,08Mpa	0,34Mpa	0,06	0,50
	Tras heladicidad B	3,60Mpa	0,40Mpa	0,11	
	Tras heladicidad C	5,24Mpa	0,16Mpa	0,03	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	42mm	2,49mm	0,06	1,24	
B- estratificación paralela	34mm	3,73mm	0,11		
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

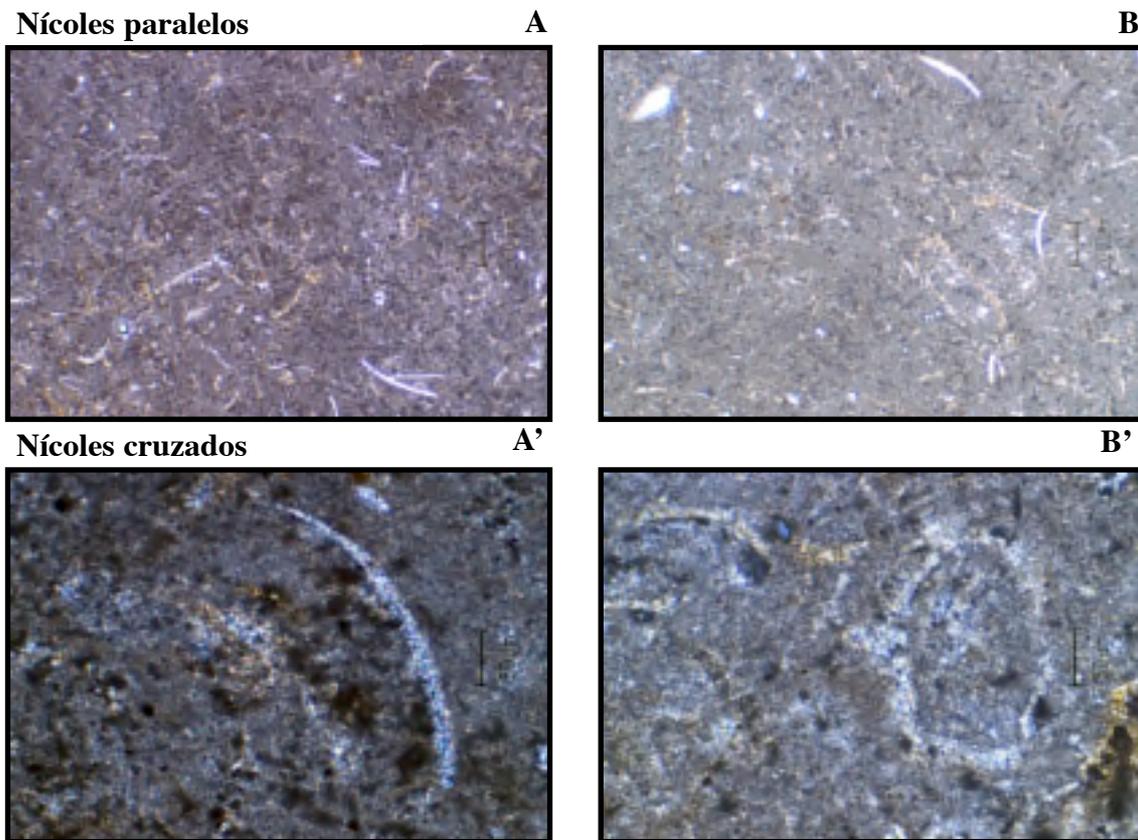
Uso Constructivo: Cantería

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.

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.



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.

Sigla: 8-Tu**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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
Sigla: 8-Tu			
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	A	46,1Mpa	2,23Mpa
 B			0,15
Resistencia a la flexión			
 A	A	6,10Mpa	0,21Mpa
 B			
 C			
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).

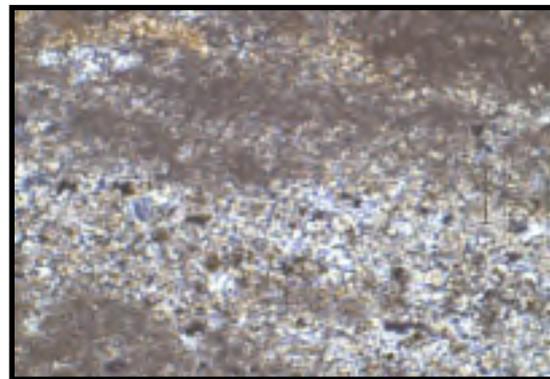
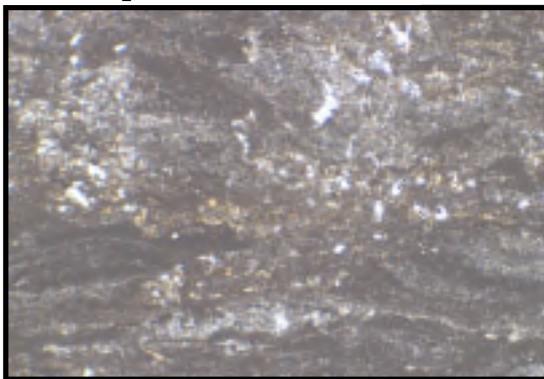
Presenta una textura granuda soportada por la matriz calcítica que alcanza una proporción del 70%. La matriz tiene un aspecto heterogéneo con variaciones en el tamaño cristalino que crean una laminación por cambios en la cristalización de la micrita. Los bioclastos son de composición calcítica y se presentan 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 principalmente con procesos de bioturbación por raíces, representa un 8% del volumen de la roca. La roca tiene una selección de 1,2-1,4.

Nícoles paralelos

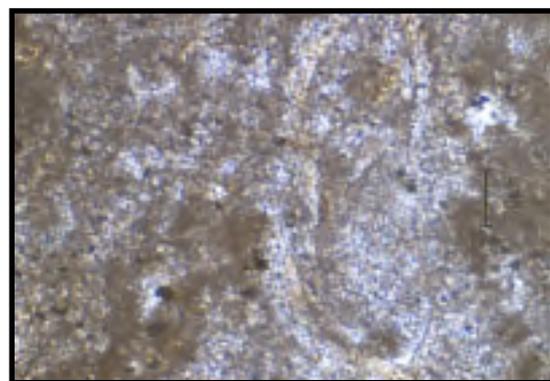
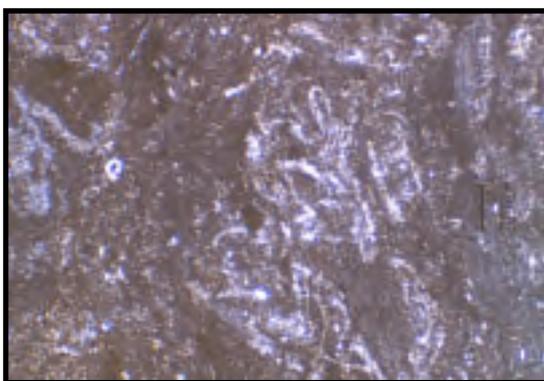
A

B



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.

Sigla: 9-Fr

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 bioturbaación por raíces. La ausencia de fisuras es más marcada cuanto más potente es el estrato.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Sigla: 9-Fr					
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  B	A	52,2Mpa	27,57Mpa	0,16	1,02
	B	53,1Mpa	28,33Mpa	0,17	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	9,65Mpa	0,71Mpa	0,07	0,19
	B	11,57Mpa	2,86Mpa	0,25	
	C	9,60Mpa	0,75Mpa	0,08	
	Tras heladicidad A	9,04Mpa	0,91Mpa	0,10	1,16
	Tras heladicidad B	12,02Mpa	1,13Mpa	0,09	
	Tras heladicidad C	2,79Mpa	0,33Mpa	0,12	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	21mm	1,49mm	0,07	1,05	
B- estratificación paralela	22mm	2,73mm	0,12		
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: Calclitita

Nombre Comercial: Piedra de Alcañiz

Uso Constructivo: Cantería

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Piedra de Alcañiz” se describe como una arenita, clasificada como Calclitita (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 feldspatos 1,4% con diferentes estados de alteración. Como elementos minoritarios pueden presentarse micas (mayoritariamente de tipo moscovita), turmalina, minerales clorítico-glaucóníticos y algún zircón.

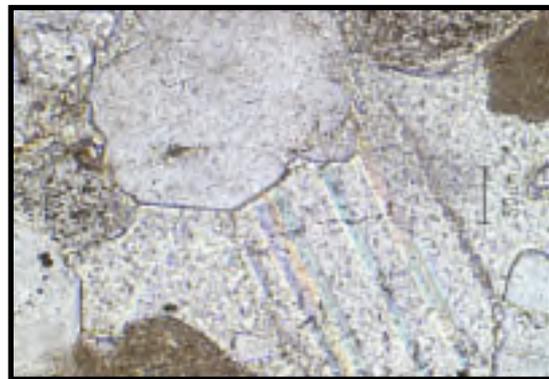
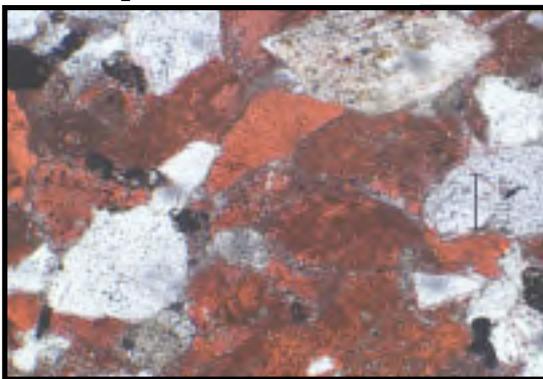
El cemento 20% es carbonatado (89%) tamaño medio 0,2 mm con contactos predominantemente curvos, (29,78% sintaxial, 6,38% intrapartícula y 63,82% interpartícula) y de cuarzo sintaxial (11%). La matriz, compuesta por filosilicatos, es poco abundante 1-3%. La porosidad es del 5%.

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.

Nícoles paralelos

A

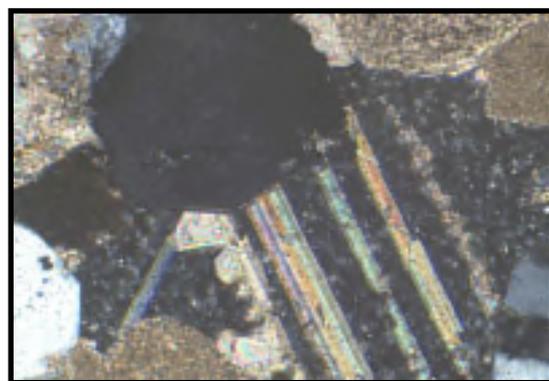
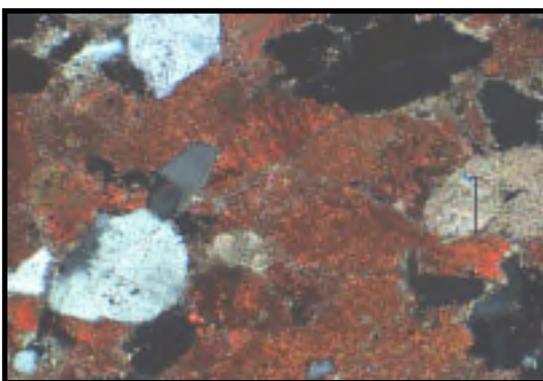
B



Nícoles cruzados

A'

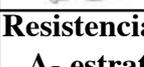
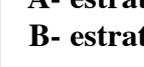
B'



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.

Sigla: 10-Az**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
Sigla: 10-Az				
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
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
 A	Tras heladicidad A	5,32Mpa	0,85Mpa	0,16
 B	Tras heladicidad B	4,65Mpa	0,32Mpa	0,07
 C	Tras heladicidad C	6,61Mpa	0,32Mpa	0,05
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 Tabuenca

Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la “Laja de Tabuenca” 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.

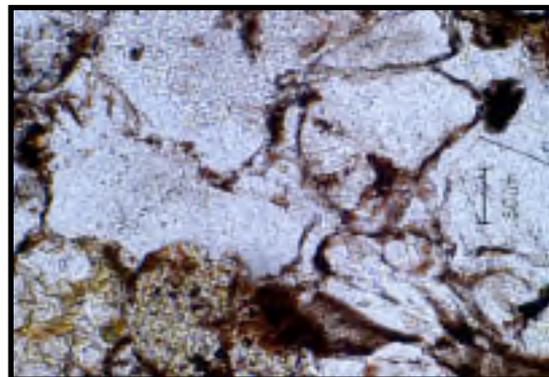
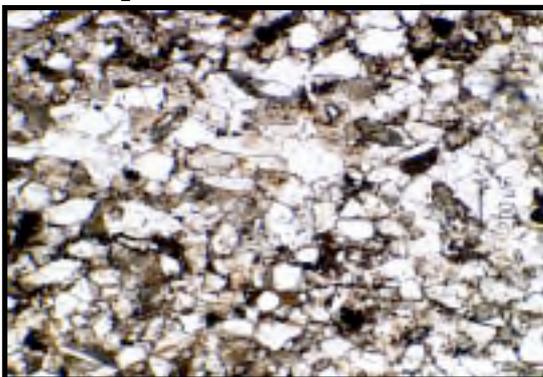
El cemento es siliceo 2% de tipo sintaxial. En conjunto se trata de una roca poco porosa y con discontinuidades escasas, rellenas por cemento de cuarzo, con espesor submilimétrico y la matriz 16% es filosilicatada.

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 tamaño 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.

Nícoles paralelos

A

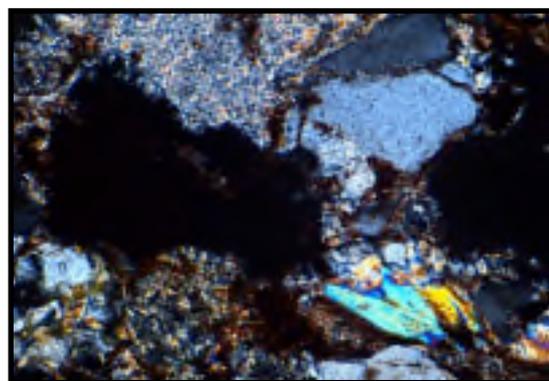
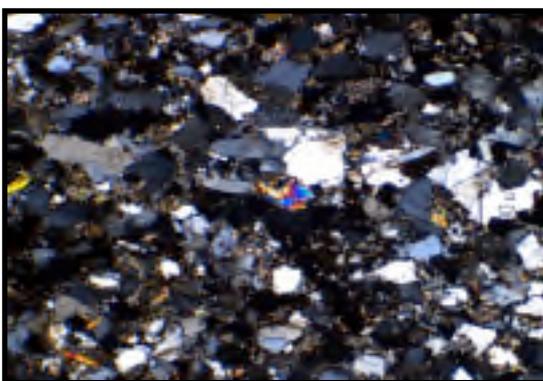
B



Nícoles cruzados

A'

B'

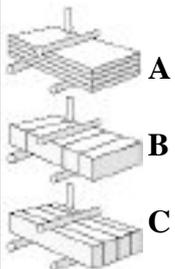


A-A' (x4) Aspecto general de la roca, zona teñida. Se diferencian clastos de cuarzo, principalmente monocristalinos, feldespatos y filosilicatos. Escala 200 micras.

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

Sigla: 11-Ta**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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
Sigla: 11-Ta				
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	88,5Mpa	76,23Mpa	0,27
	B	89,0Mpa	17,73Mpa	0,07
1,01				
Resistencia a la flexión				
	A	18,11Mpa	1,22Mpa	0,07
	B	Tras heladicidad A	16,36Mpa	1,46Mpa
C	0,09			
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 esqueletales con tamaños de 20-80 micras (pelecípodos del genero *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 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 esqueletales, 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.

Nícoles paralelos

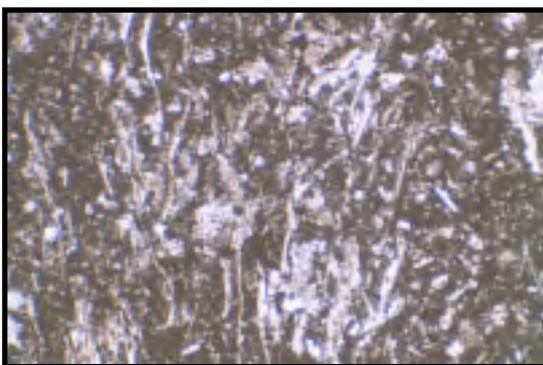
A

B



A'

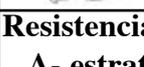
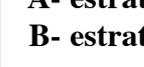
B'



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.

Sigla: 12-Ca

Descripción de Visu: Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, microcristalino, 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.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Sigla: 12-Ca1				
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	A	102Mpa	31,55Mpa	0,09
 B	B	95,4Mpa	48,34Mpa	0,16
Resistencia a la flexión				
 A	A	23,04Mpa	3,30Mpa	0,14
 B	B	9,24Mpa	4,68Mpa	0,51
 C	C	23,38Mpa	2,92Mpa	0,12
 A	Tras heladicidad A	27,44Mpa	3,05Mpa	0,11
 B	Tras heladicidad B	12,86Mpa	5,42Mpa	0,42
 C	Tras heladicidad C	26,49Mpa	3,84Mpa	0,14
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

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía	
Sigla: 12-Ca2					
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  B	A	86,3Mpa	41,23Mpa	0,15	1,11
	B	95,3Mpa	33,94Mpa	0,11	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	18,92Mpa	1,21Mpa	0,06	0,47
	B	20,02Mpa	1,57Mpa	0,08	
	C	29,61Mpa	2,57Mpa	0,09	
	Tras heladicidad A	19,91Mpa	5,84Mpa	0,29	0,27
	Tras heladicidad B	21,29Mpa	2,12Mpa	0,09	
	Tras heladicidad C	26,01Mpa	4,34Mpa	0,17	
Resistencia al choque					
A- estratificación perpendicular	39cm	14,62cm	0,54	1,17	
B- estratificación paralela	26cm	3,72cm	0,16		
Microdureza Knoop					
A- estratificación perpendicular	952,4Mpa	0,25Mpa	0,0002	1,17	
B- estratificación paralela	812,6Mpa	0,47Mpa	0,0005		
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

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Sigla: 12-Ca3				
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  B	A	99,4Mpa	51,06Mpa	0,16
	B	91,8Mpa	49,82Mpa	0,17
Resistencia a la flexión				
 A  B  C	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	1,08
B- estratificación paralela	29cm	6,78cm	0,28	
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	565,7Mpa	0,17Mpa	0,0003	1,17
B- estratificación paralela	663,2Mpa	0,15Mpa	0,0001	
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 Albortón

Uso Constructivo: Ornamental

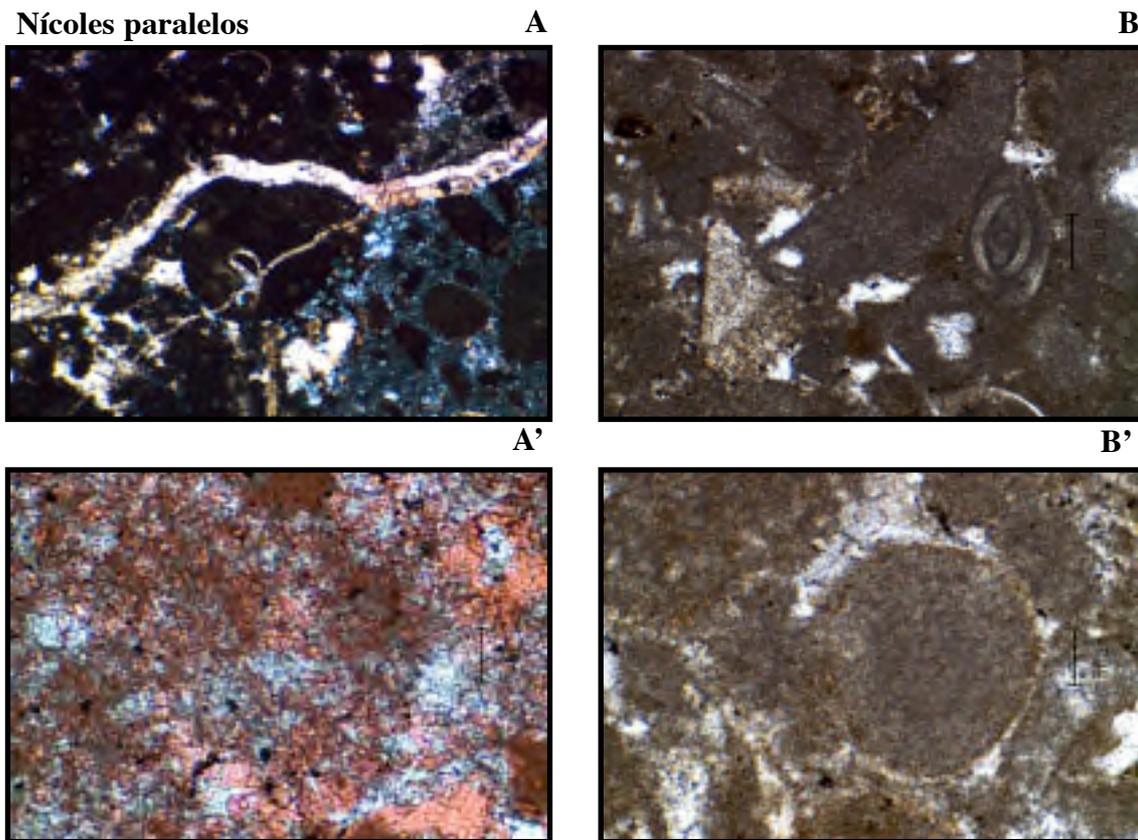
Descripción petrográfica:

Petrográficamente, la Piedra “Amarillo Puebla de Albortón” 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 clástica 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.

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.

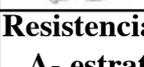
Nícoles paralelos



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.

Sigla: 13-Pu

Descripción de Visu: Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color heterogéneo, 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
Sigla: 13-Pu				
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
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
 A	Tras heladicidad A	26,77Mpa	1,41Mpa	0,05
 B	Tras heladicidad B	21,96Mpa	3,87Mpa	0,18
 C	Tras heladicidad C	21,91Mpa	2,26Mpa	0,10
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-A1

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).

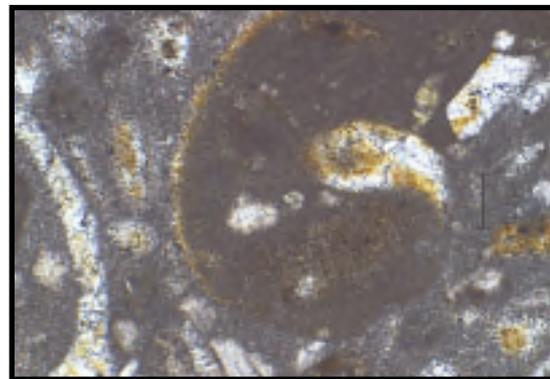
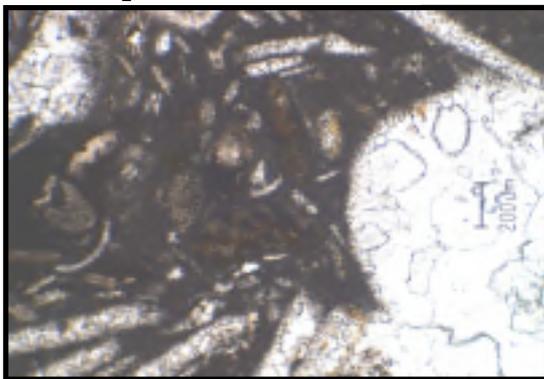
La roca presenta una textura granuda no granosostenida y su esqueleto está compuesto mayoritariamente por bioclastos 43% de hasta 3 mm de longitud y, en menor proporción, por intraclastos 4%. Los bioclastos presentes son: gasterópodos (45%) con un tamaño medio de 0,8 mm, bivalvos (35%) con un tamaño 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 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%.

Nícoles paralelos

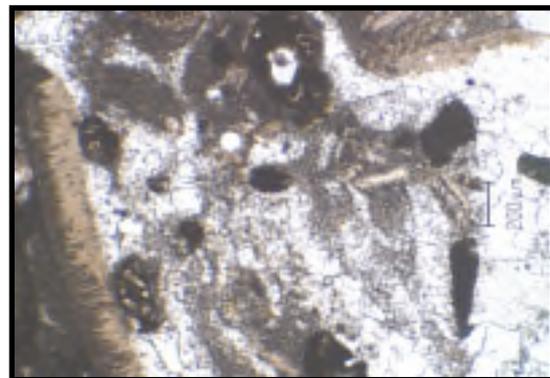
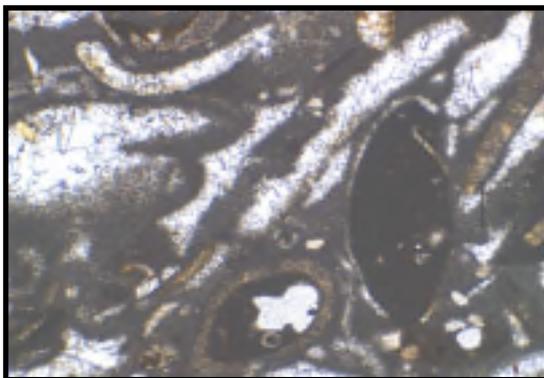
A

B



A'

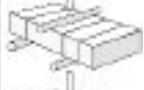
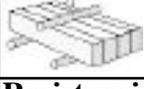
B'



A-A' (x4) Aspecto general de la roca. Contacto entre zonas micríticas y esparíticas.
A' (x4) Braquiópodos. Escala 200 micras. **B(x10)** Fragmentos de bioclastos (gasterópodos y bivalvos) con mosaicos de calcita esparítica en la porosidad móldica, englobados en una matriz de tamaño heterogéneo. **B'(x4)** Zonas con predominio de esparita frente a matriz.

Sigla: 14-A1

Descripción de Visu: Macroscópicamente la roca tiene un aspecto masivo, de color heterogéneo 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
Sigla: 14-A1				
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	1,02
 B	B 60Mpa	17,85Mpa	0,09	
Resistencia a la flexión				
 A	A 13,74Mpa	3,26Mpa	0,24	0,14
 B	B 13,35Mpa	3,69Mpa	0,28	
 C	C 15,27Mpa	2,78Mpa	0,18	
 B	Tras heladicidad A 15,74Mpa	2,33Mpa	0,15	
 C	Tras heladicidad C 15,32Mpa	0,64Mpa	0,04	0,03
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	24mm	1,53mm	0,06	1,00
B- estratificación paralela	24mm	0,76mm	0,32	
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.

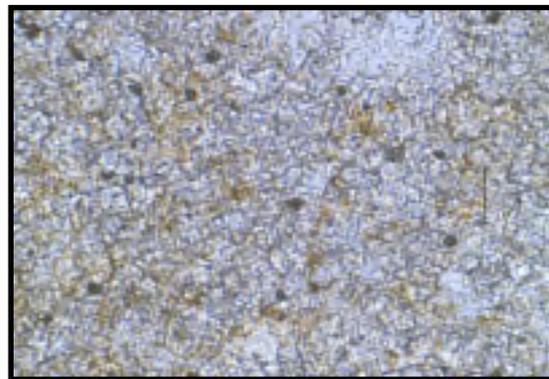
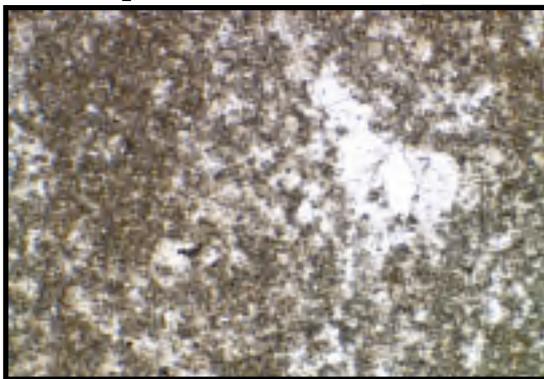
La roca presenta textura cristalina, la matriz recristalizada a microesparita representa un porcentaje del 70% y está compuesta por un mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares. El tamaño máximo de los cristales es de 25 micras y el tamaño medio es de 15 micras. La calcita esparítica 25% tiene 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

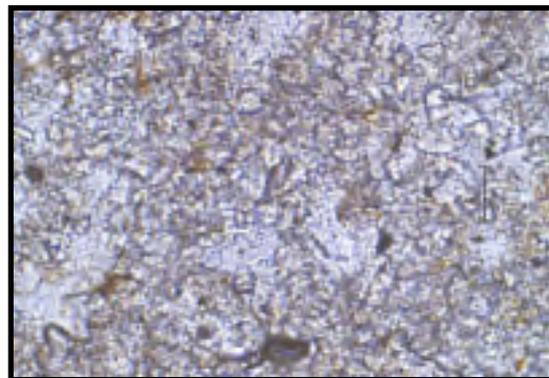
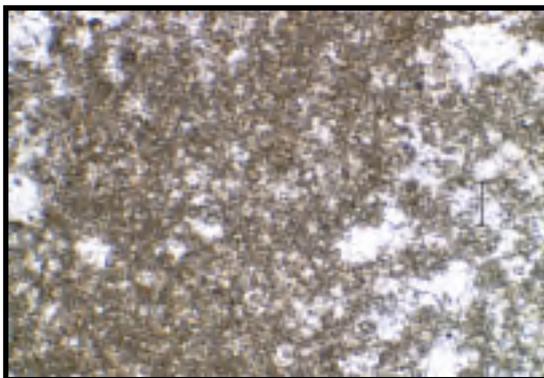
A

B



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.

Sigla: 15-Ce

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
Sigla: 15-Ce				
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
 B	Tras heladicidad A	24,99Mpa	0,413Mpa	0,02
 C	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

Análisis de la varianza

	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

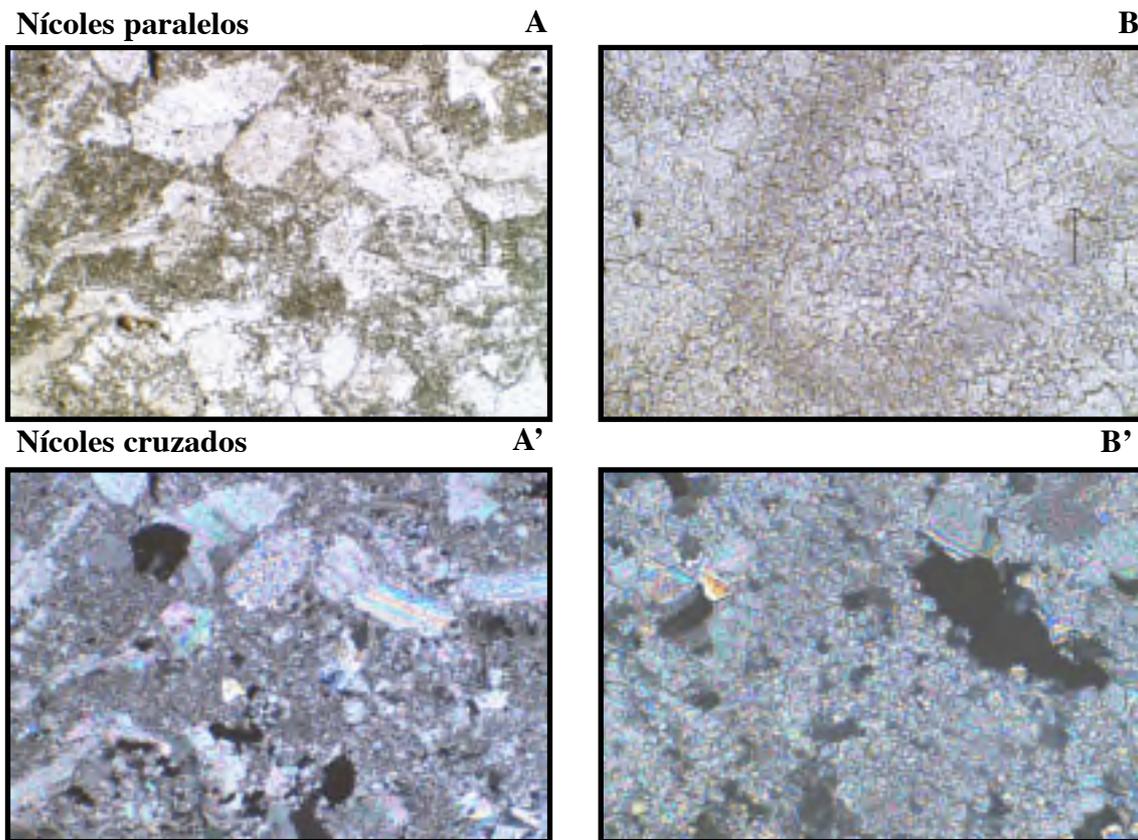
Uso Constructivo: Ornamental

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%).

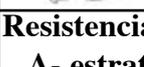
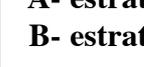
La porosidad de la roca es del 5%, presentando un amplio rango de tamaños de poro, desde unas micras hasta varios milímetros y con un diámetro medio de 1 mm.



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.

Sigla: 16-VI-I**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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 submilimétricas.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Sigla: 16-VI-I				
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	1,08
 B	B 46,4Mpa	33,41Mpa	0,23	
Resistencia a la flexión				
 A	A 9,55Mpa	0,91Mpa	0,09	0,08
 B	B 10,12Mpa	1,72Mpa	0,17	
 C	C 10,32Mpa	1,32Mpa	0,13	
 A	Tras heladicidad A 7,55Mpa	0,64Mpa	0,08	0,25
 B	Tras heladicidad B 6,66Mpa	1,18Mpa	0,18	
 C	Tras heladicidad C 8,59Mpa	0,95Mpa	0,11	
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	26cm	8,83cm	0,48	1,11
B- estratificación paralela	30cm	11,01cm	0,55	
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	753,9Mpa	0,42Mpa	0,0005	1,06
B- estratificación paralela	800,3Mpa	0,43Mpa	0,0005	
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.

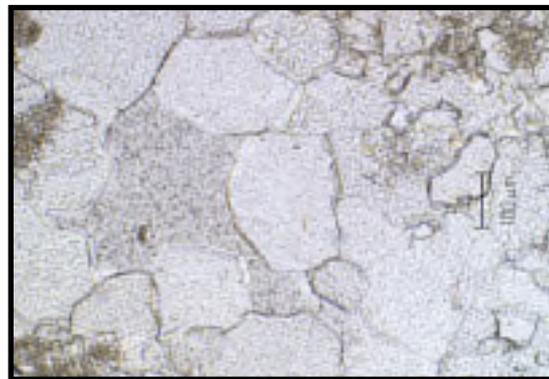
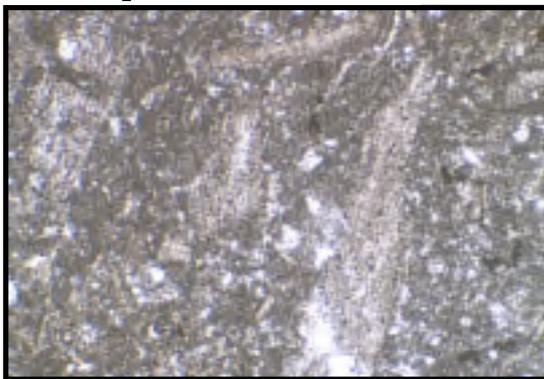
Estas rocas presentan una textura cristalina, la matriz recristalizada de micrita a microesparita representa un 63% en 17-CFI y un 38% en 17-CFS. Está compuesta por un mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares de tamaño medio 15 micras. La calcita esparítica 15% en 17-CFI y 37% en 17-CFS se 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.

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.

Nícoles paralelos

A

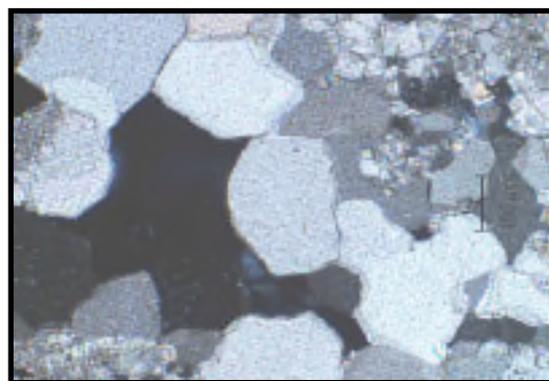
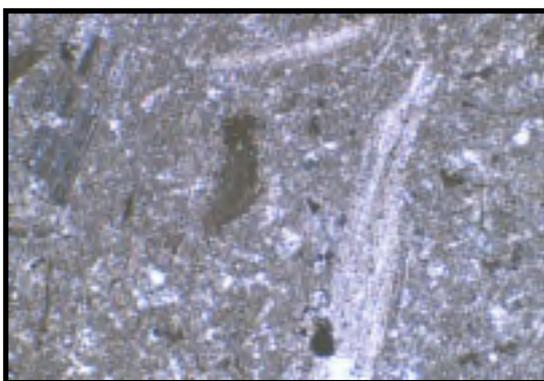
B



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.

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.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación
Sigla: 17-CFI			
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-CFS**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.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación
Sigla: 17-CFS			
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

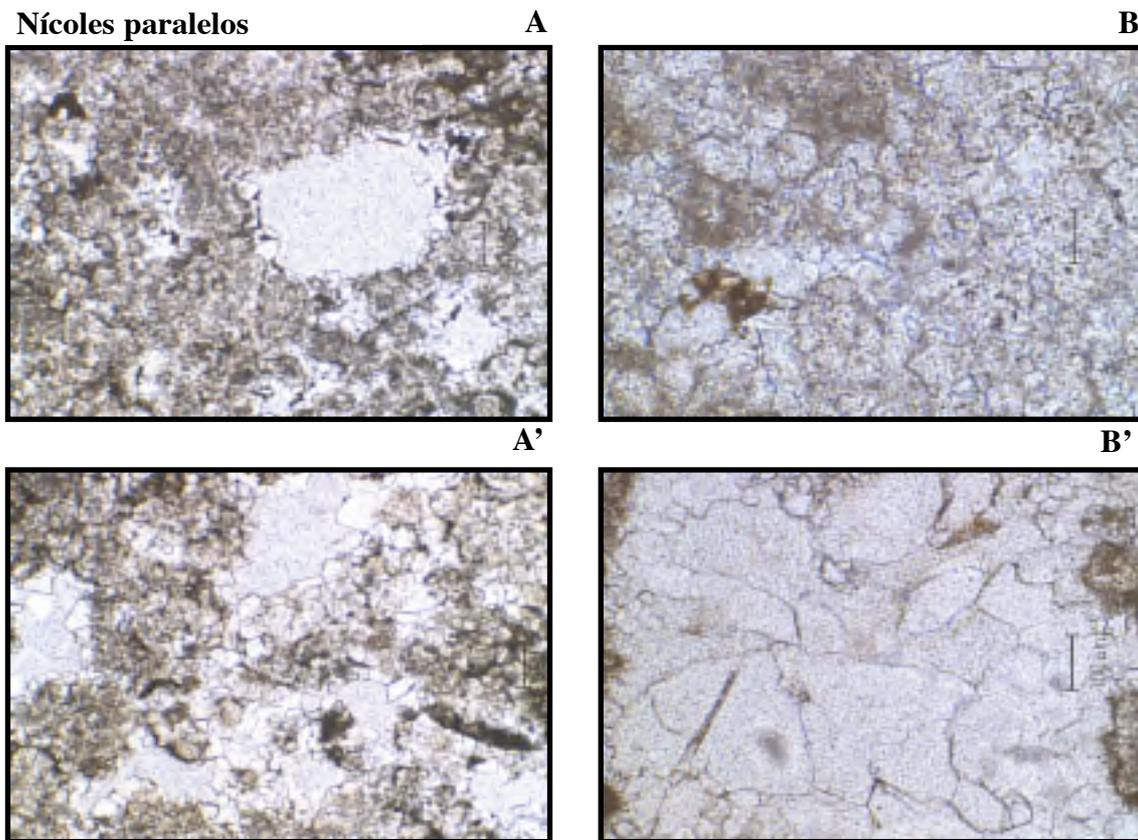
Uso Constructivo: Ornamental

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.

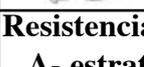
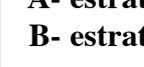
La roca posee una porosidad elevada, del orden del 15-20%, con poros que presentan un amplio rango de tamaños (desde unas micras hasta 3 mm).



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 inequi-granulares. Escala 50 micras. **B' (x10)** Mosaico drúsico de esparita calcítica.

Sigla: 18-VI-II**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
Sigla: 18-VI-II				
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	1,02
 B	B 39,8Mpa	19,61Mpa	0,15	
Resistencia a la flexión				
 A	A 8,49Mpa	2,22Mpa	0,26	0,22
 B	B 7,06Mpa	2,05Mpa	0,29	
 C	C 8,85Mpa	1,33Mpa	0,15	
 A	Tras heladicidad A 9,05Mpa	1,49Mpa	0,16	0,32
 B	Tras heladicidad B 6,64Mpa	1,30Mpa	0,20	
 C	Tras heladicidad C 6,87Mpa	3,15Mpa	0,46	
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	41cm	10,93cm	0,35	1,07
B- estratificación paralela	38cm	9,03cm	0,31	
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	1152,5Mpa	0,52Mpa	0,0004	1,31
B- estratificación paralela	878,3Mpa	0,22Mpa	0,0002	
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 Villoros

Uso Constructivo: Lajas

Descripción petrográfica:

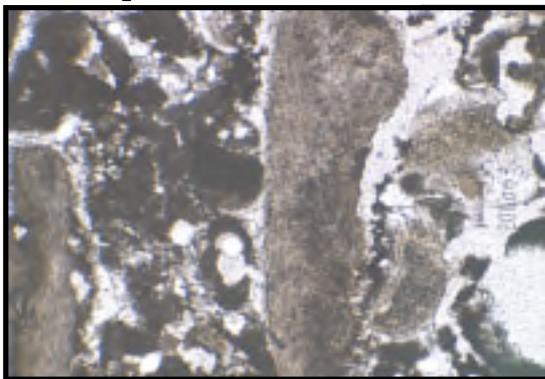
Petrográficamente, la “Piedra Caliza Torre Villoros” se describe como una roca carbonatada muy cementada clasificada como Bioesparita según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

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 esqueléticos, 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%.

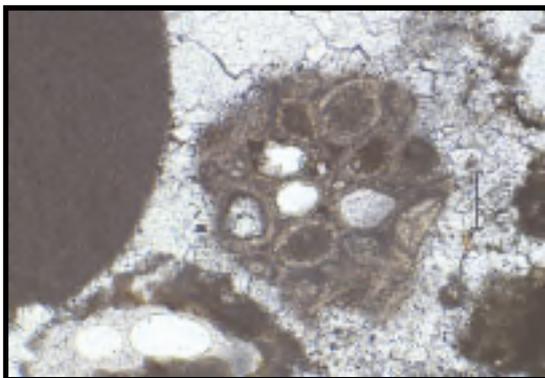
La roca presenta una selección de 1,2-1,4 con un tamaño máximo de los granos de 2,5 mm y un tamaño medio de 0,75 mm. Los granos son subredondeados-redondeados presentando una esfericidad variable y los contactos son predominantemente de tipo largo.

Nícoles paralelos

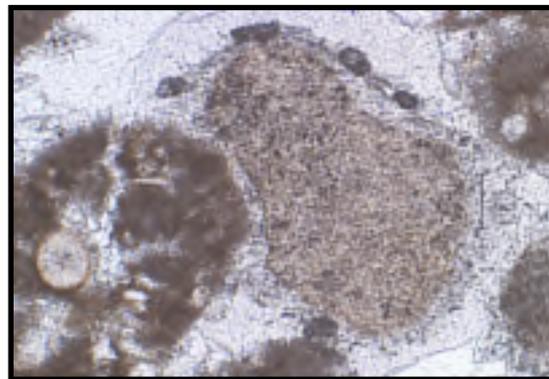
A



A'



B



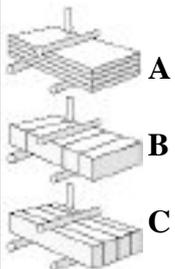
B'

Nícoles cruzados

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.

Sigla: 19-To

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	
Sigla: 19-To					
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	50Mpa	2,93Mpa	0,19	2,24
	B	112Mpa	5,19Mpa	0,15	
Resistencia a la flexión					
	A	15,90Mpa	0,44Mpa	0,09	0,70
	B	12,50Mpa	0,29Mpa	0,07	
	C	25,03Mpa	1,32Mpa	0,17	
	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).

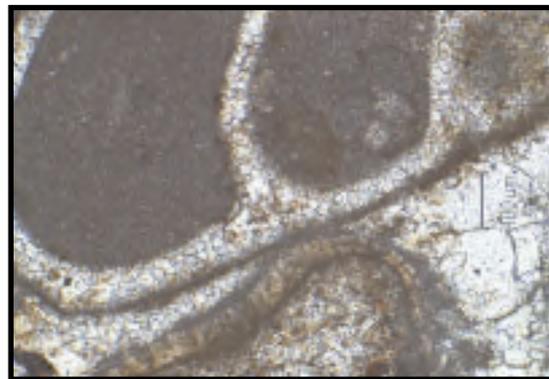
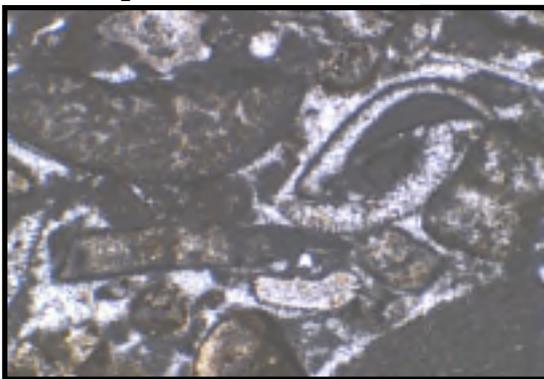
Presenta una textura granuda granosostenida. Los aloquímicos encontrados son bioclastos 28% con bordes micritizados y en ocasiones, envueltas ferruginosas, intraclastos 19% y ooides 7%. Como minerales detríticos destaca la presencia de cuarzo (menos del 1%). Los granos de mayores dimensiones son los 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.

La micrita es muy escasa (3%). La cementación de estos granos la produce la esparita calcítica 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.

Nícoles paralelos

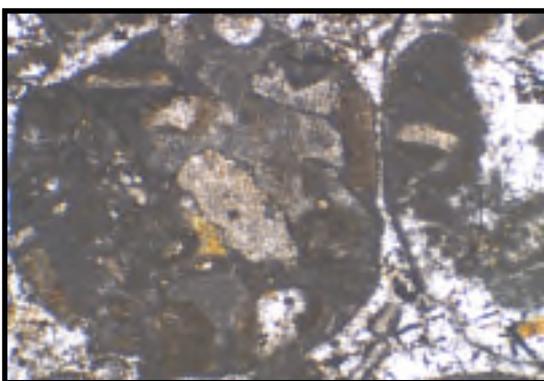
A

B



A'

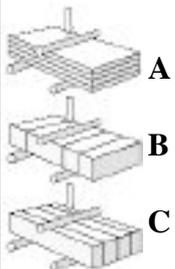
B'



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.

Sigla: 20-Mi**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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	
Sigla: 20-Mi					
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	1,37
	B	54,9Mpa	22,01Mpa	0,12	
Resistencia a la flexión					
	A	6,85Mpa	3,67Mpa	0,54	0,68
	B	14,41Mpa	1,86Mpa	0,13	
	C	12,25Mpa	1,72Mpa	0,14	
	Tras heladicidad B	11,96Mpa	1,01Mpa	0,08	0,62
	Tras heladicidad C	6,14Mpa	5,80Mpa	0,94	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	26mm	1,59mm	0,06	1,06	
B- estratificación paralela	27,5mm	2,70mm	0,10		

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.

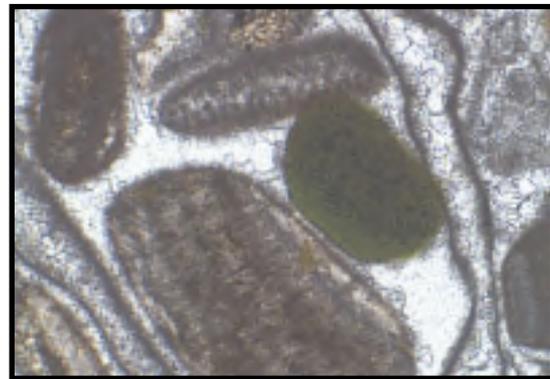
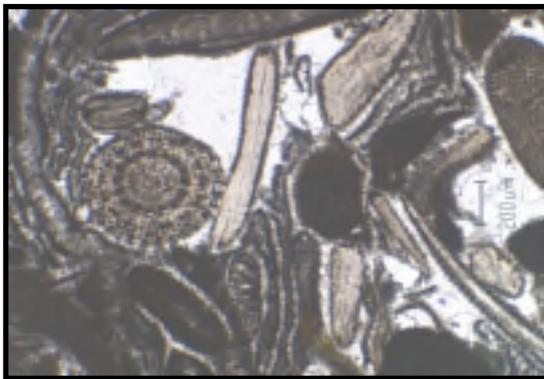
Estas variedades se diferencian entre sí en el porcentaje de aloquímicos. En la variedad 21-Cv1 los aloquímicos son bioclastos 47% (braquiópodos (60%) tamaño medio 2 mm, equinodermos (25%) tamaño medio 0,5 mm y gasterópodos (5%) tamaño medio 0,7 mm) y ooides 10%. En la variedad 21-Cv2 los aloquímicos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

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 syntaxial 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.

Nícoles paralelos

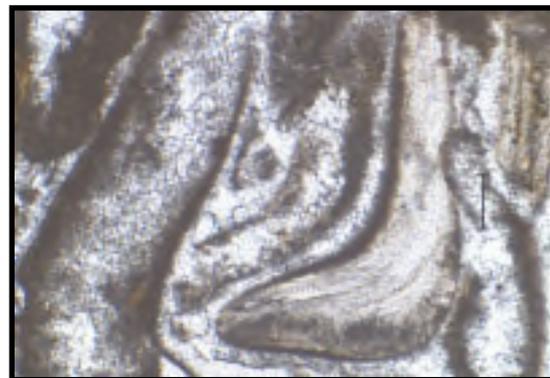
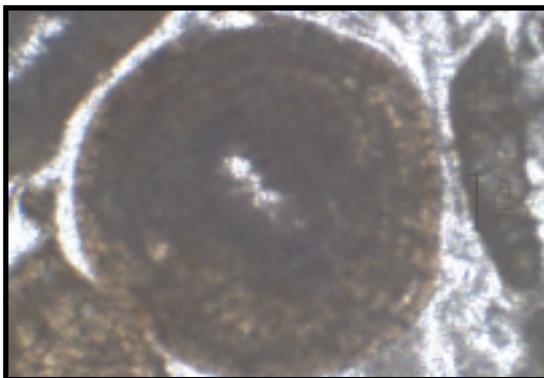
A

B



A'

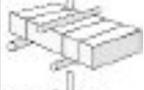
B'



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.

Sigla: 21-Cv

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.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Sigla: 21-Cv1				
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	A 64,3Mpa	60,74Mpa	0,30	1,28
 B	B 82,0Mpa	60,76Mpa	0,23	
Resistencia a la flexión				
 A	A 17,82Mpa	0,24Mpa	0,01	1,29
	B 2,38Mpa	0,43Mpa	0,18	
	C 15,71Mpa	2,16Mpa	0,14	
 B	Tras heladicidad A 15,73Mpa	1,39Mpa	0,09	1,30
	Tras heladicidad B 1,78Mpa	0,53Mpa	0,30	
	Tras heladicidad C 14,73Mpa	2,64Mpa	0,18	
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	21,5mm	0,41mm	0,02	1
B- estratificación paralela	21,5mm	1,46mm	0,07	

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

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS Sigla: 21-Cv2		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  B	A	67,7Mpa	10,63Mpa	0,05	1,03
	B	70,0Mpa	21,44Mpa	0,10	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	17,77Mpa	0,81Mpa	0,05	0,35
	B	12,36Mpa	0,70Mpa	0,06	
	C	18,04Mpa	0,92Mpa	0,05	
	Tras heladicidad A	17,96Mpa	2,83Mpa	0,16	0,37
	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	1,05	
B- estratificación paralela	20mm	2,16mm	0,11		

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

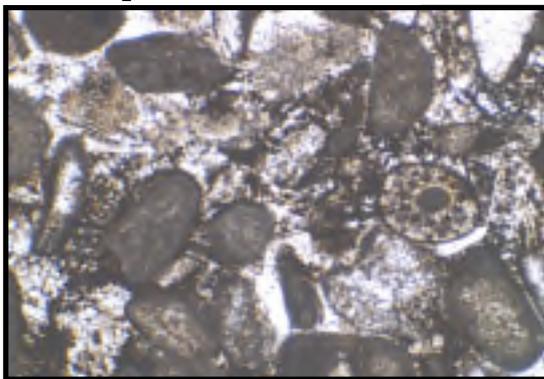
Descripción petrográfica: Petrográficamente, la “Piedra de la Iglesuela” se describe como una roca carbonatada clasificada como Bioesparita según la clasificación de Folk (1962) o Grainstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

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.

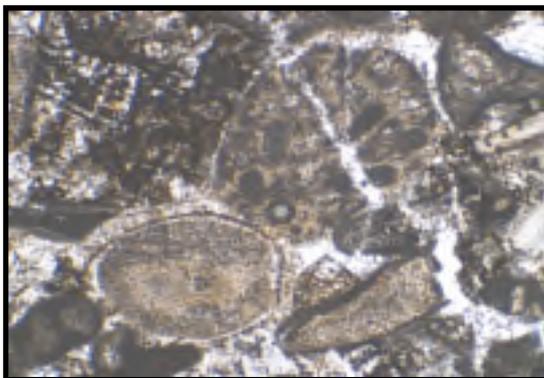
El cemento de calcita esparítica 33% muestra un tamaño medio de 0,2 mm y un tamaño máximo de 1,2 mm. Se dispone en los espacios interparticulares e intraparticulares con contactos entre los cristales de tipo planar y curvo. Las placas de equinodermo se caracterizan por tener cemento sintaxial de sobrecrecimiento. 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.

Nícoles paralelos

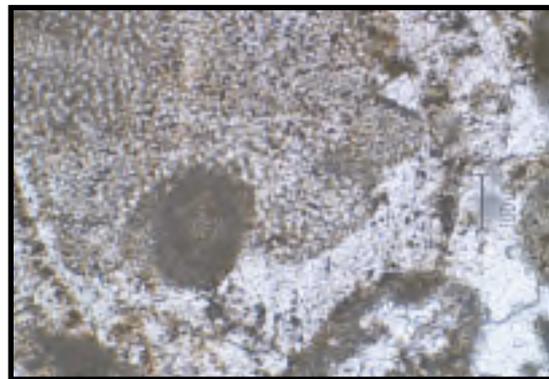
A



A'

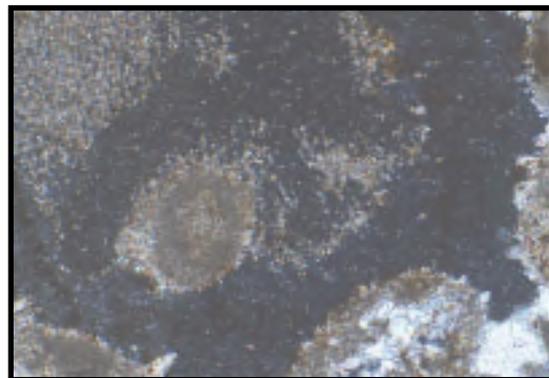


B



Nícoles cruzados

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 sintaxial de calcita esparítica.

Sigla: 22-Ig

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 microfósiles, aunque los microfósiles pueden alcanzar 3,5 mm de longitud. La principal discontinuidad son grietas milimétricas que aparecen frecuentemente selladas por calcita.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Sigla: 22-Ig				
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	A	77,2Mpa	30,15Mpa	0,12
 B	B	110,2Mpa	51,17Mpa	0,23
Resistencia a la flexión				
 A	A	13,88Mpa	4,22Mpa	0,30
 B	B	12,29Mpa	2,37Mpa	0,19
 C	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

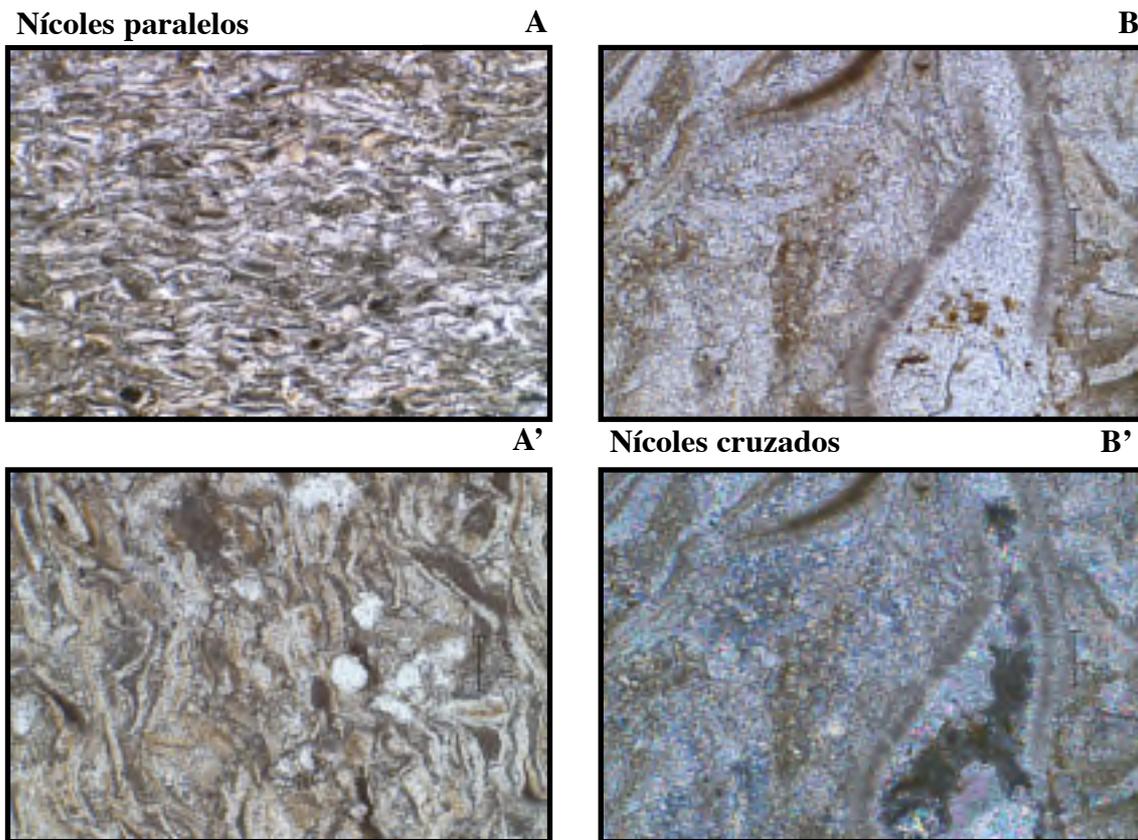
Uso Constructivo: Cantería y lajas

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%.

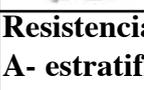
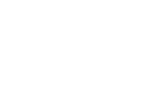


A-A' Aspecto general de la roca. Laminación por la orientación de los bivalvos. **A** (x4) Escala 200 micras, **A'**(x10) Escala 100 micras.

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

Sigla: 23-Mq1

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
Sigla: 23-Mq1				
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	1,26
 B	B 63,9Mpa	81,50Mpa	0,40	
Resistencia a la flexión				
 A	A 25,81Mpa	7,93Mpa	0,31	1,10
 B	B 5,20Mpa	3,46Mpa	0,67	
 C	C 26,20Mpa	7,45Mpa	0,28	
 B	Tras heladicidad A 31,58Mpa	6,29Mpa	0,20	1,20
 C	Tras heladicidad B 7,22Mpa	3,21Mpa	0,45	
 C	Tras heladicidad C 22,33Mpa	5,39Mpa	0,24	
Resistencia al desgaste por abrasión				
A- estratificación perpendicular	19,5mm	1,80mm	0,09	1,21
B- estratificación paralela	23,5mm	0,55mm	0,02	

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%.

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.

Nícoles paralelos

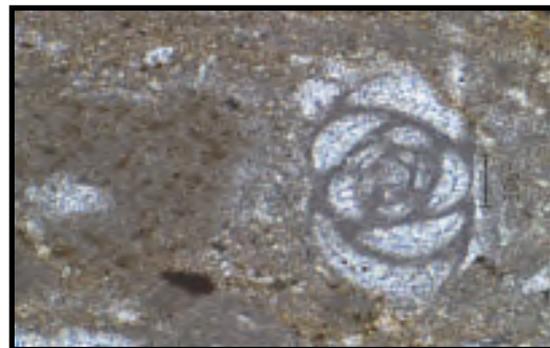
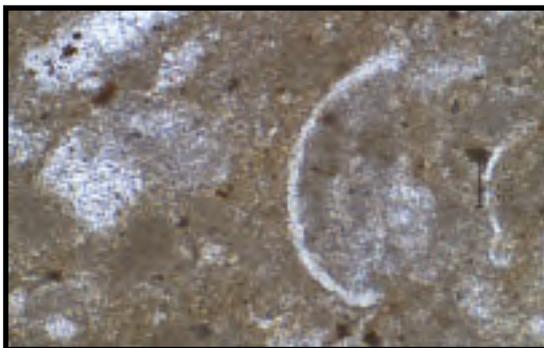
A

B



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

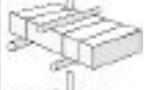
Sigla: 24-Mq2

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 macrofósiles. Las principales discontinuidades observadas en las cuatro variedades son venillas submilimétricas de continuidad decimétrica rellenas por carbonato.

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS		Desviación Estándar	Coef. Variación	Anisotropía
Sigla: 24-Mq21				
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	1,21
 B	B 78,8Mpa	62,31Mpa	0,25	
Resistencia a la flexión				
 A	A 17,58Mpa	4,13Mpa	0,24	0,87
	B 7,28Mpa	4,17Mpa	0,57	
	C 20,33Mpa	3,99Mpa	0,20	
 B	Tras heladicidad A 26,90Mpa	3,00Mpa	0,11	1,17
	Tras heladicidad B 6,23Mpa	3,39Mpa	0,54	
	Tras heladicidad C 19,95Mpa	8,32Mpa	0,42	
 C	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	

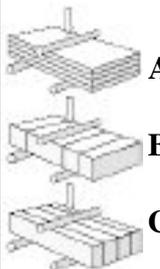
Análisis de la varianza

	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

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS Sigla: 24-Mq22		Desviación Estándar	Coef. 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  B	A	88,3Mpa	27,97Mpa	0,10	1,02
	B	90,4Mpa	37,45Mpa	0,13	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	24,26Mpa	2,84Mpa	0,12	0,07
	C	26,05Mpa	1,15Mpa	0,04	
	Tras heladicidad A	3,73Mpa	3,75Mpa	1,00	1,76
Tras heladicidad B	6,17Mpa	3,64Mpa	0,59		
Tras heladicidad C	23,10Mpa	6,98Mpa	0,30		
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	20,5mm	1,49mm	0,07	1,03	
B- estratificación paralela	20mm	0,69mm	0,03		

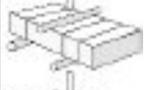
Análisis de la varianza

	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

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS Sigla: 24-Mq23		Desviación Estándar	Coef. Variación	Aniso- tropía	
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 B	A	85,8Mpa	20,49Mpa	0,07	1,03
	B	88,7Mpa	33,88Mpa	0,12	
Resistencia a la flexión					
 A B C	A	14,53Mpa	6,96Mpa	0,48	0,71
	B	7,14Mpa	5,64Mpa	0,79	
	C	16,03Mpa	5,85Mpa	0,36	
	Tras heladicidad A	10,43Mpa	13,75Mpa	1,32	1,28
	Tras heladicidad B	6,17Mpa	3,64Mpa	0,59	
	Tras heladicidad C	23,10Mpa	6,97Mpa	0,30	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	20mm	1,49mm	0,07	1	
B- estratificación paralela	20mm	2,65mm	0,13		

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

RESULTADOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS Sigla: 24-Mq24		Desviación Estándar	Coef. 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  B	A	77,1Mpa	42,91Mpa	0,17	1,30
	B	100Mpa	26,91Mpa	0,08	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	15,51Mpa	4,47Mpa	0,29	0,60
	B	10,99Mpa	1,38Mpa	0,12	
	C	20,45Mpa	2,45Mpa	0,12	
	Tras heladicidad A	18,62Mpa	6,27Mpa	0,34	0,70
	Tras heladicidad B	10,21Mpa	4,17Mpa	0,41	
	Tras heladicidad C	22,13Mpa	4,07Mpa	0,18	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular	19,5mm	2,18mm	0,11	1,08	
B- estratificación paralela	21mm	1,24mm	0,06		

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:

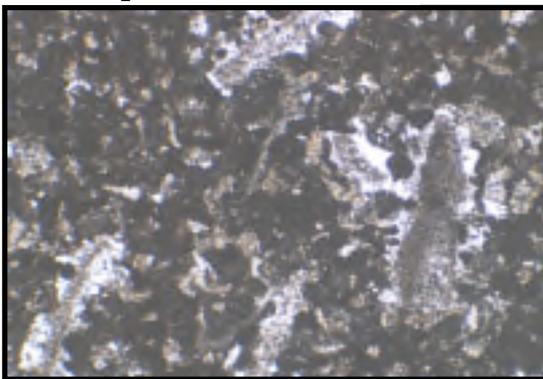
Petrográficamente, la “Piedra Losa Blanca/Fósil Blanca” se describe como una roca carbonatada de grano fino clasificada como una Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

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.

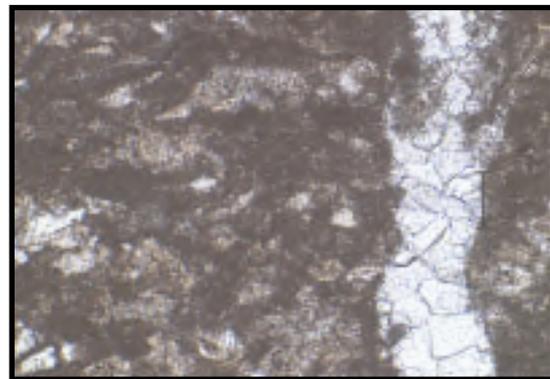
La calcita esparítica 10% de tamaño medio 0,1 mm se dispone en el espacio intergranular, sellando parte de la porosidad móldica en mosaicos de tipo esparítico sintaxial y en mosaicos drúsicos en la porosidad de fractura. La porosidad de la roca es del 4% y corresponde a poros intergranulares y a la porosidad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

Nícoles paralelos

A

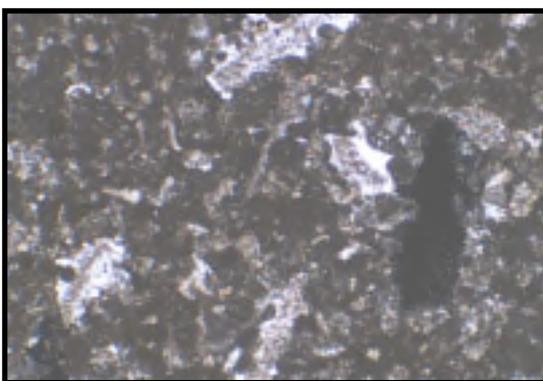


B



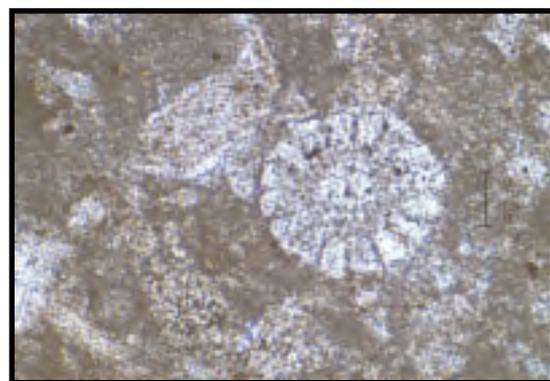
Nícoles cruzados

A'



Nícoles paralelos

B'

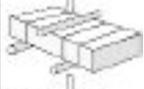


A -A'(x4) Aspecto general de la roca. Se observan placas de crinoide con cemento de calcita sintaxial. Escala 200 micras.

B (x10) Detalle de cemento de calcita esparítica dispuesto en la porosidad de fractura. Escala 100 micras. **B' (x20)** Radiola de equínido. Escala 50 micras.

Sigla: 25-Pm

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 esparítica 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
Sigla: 25-Pm				
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
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
	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
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).

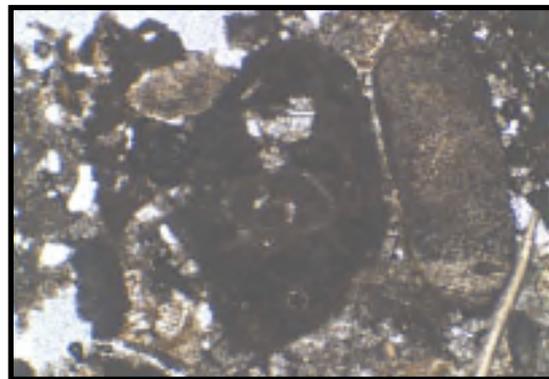
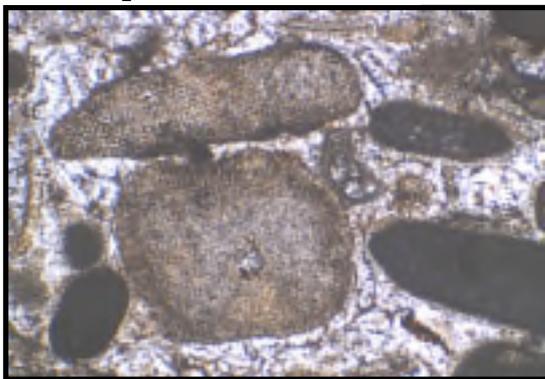
Presenta una textura granuda granosostenida. Los aloquímicos son bioclastos 44%, intraclastos 26% y ooides 1%. Los bioclastos muestran una distribución heterogénea de su tamaño de grano, correspondiendo los tamaños mayores a los briozoos 2 mm. Los bioclastos más abundantes son los equinodermos (68%), 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 tapizando parcialmente la porosidad interpartícula, intrapartícula y de fractura (en mosaicos de tipo drúsico). 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.

Nícoles paralelos

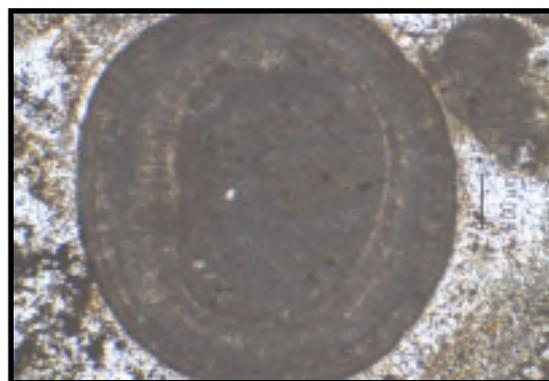
A

B



A'

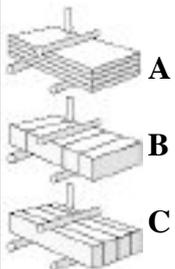
B'



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.

Sigla: 26-No

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	
Sigla: 26-No					
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	60,2Mpa	46,47Mpa	0,24	1.08
	B	65,2Mpa	35,63Mpa	0,17	
Resistencia a la flexión					
	A	17,56Mpa	2,24Mpa	0,13	0,27
	B	13,37Mpa	2,24Mpa	0,17	
	C	16,33Mpa	2,77Mpa	0,17	
Resistencia al desgaste por abrasión					
A- estratificación perpendicular		21mm	1,03mm	0,05	1,07
B- estratificación paralela		22,5mm	1,11mm	0,05	

Análisis de la varianza

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

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).

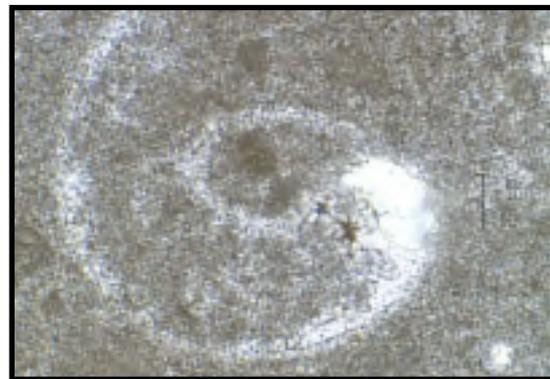
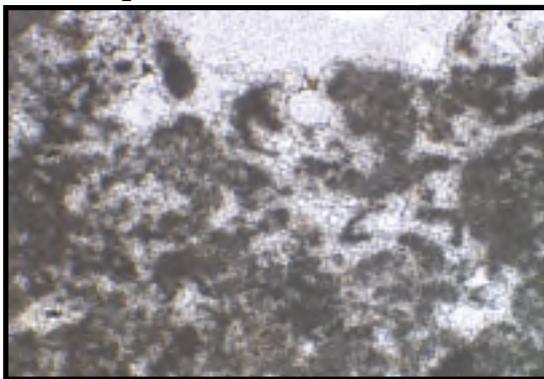
La roca posee una textura cristalina compuesta por cristales subidiomorfos inequigranulares de calcita microesparítica 60% de 15 micras de tamaño medio con contactos predominantemente de tipo planar y calcita esparítica 15%. La calcita esparítica se caracteriza por presentar sus bordes cristalinos irregulares 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

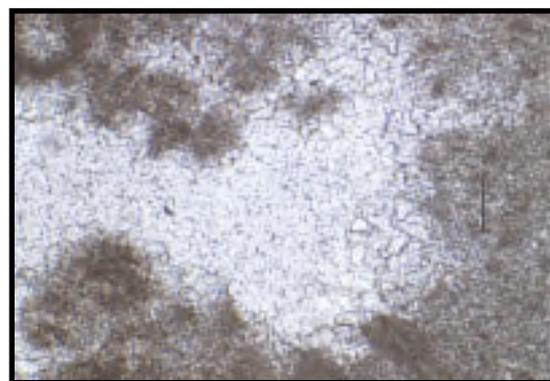
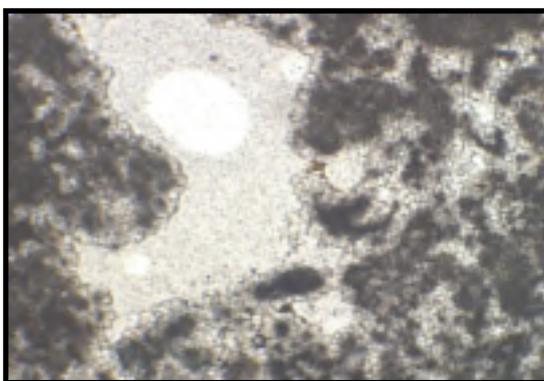
A

B



A'

B'

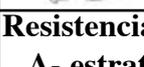
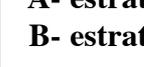


A-A' (x4) Aspecto general de la roca, textura cristalina. Cristales subidiomorfos de calcita microesparítica. Amplio rango de tamaños de poro. **B (x10)** Microesparita calcítica en mosaico de cristales subeuhedrales inequigranulares con relictos de bioclastos.

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

Sigla: 27-Tr**Descripción de Visu:**

Macrocópicamente 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
Sigla: 27-Tr				
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	1,06
 B	B 38,8Mpa	24,72Mpa	0,20	
Resistencia a la flexión				
 A	A 9,52Mpa	1,14Mpa	0,12	0,09
 B	B 10,23Mpa	1,11Mpa	0,11	
 C	C 10,43Mpa	0,68Mpa	0,06	
 A	Tras heladicidad A 10,74Mpa	0,75Mpa	0,07	0,01
 B	Tras heladicidad B 10,70Mpa	0,56Mpa	0,05	
 C	Tras heladicidad C 10,76Mpa	1,33Mpa	0,12	
Resistencia al choque				
A- estratificación perpendicular	33cm	9,54cm	0,40	1,04
B- estratificación paralela	31cm	8,83cm	0,38	
Microdureza Knoop				
A- estratificación perpendicular	812,6Mpa	0,87Mpa	0,001	1,15
B- estratificación paralela	936,9Mpa	0,47Mpa	0,0005	
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:

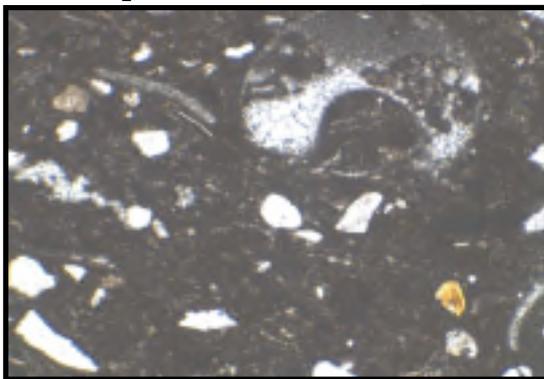
Petrográficamente, la “Piedra Crema Teruel” se describe como una roca carbonatada clasificada como Biomicrita según la clasificación de Folk (1962) o Wackstone Bioclástico según la clasificación de Dunham (1962).

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.

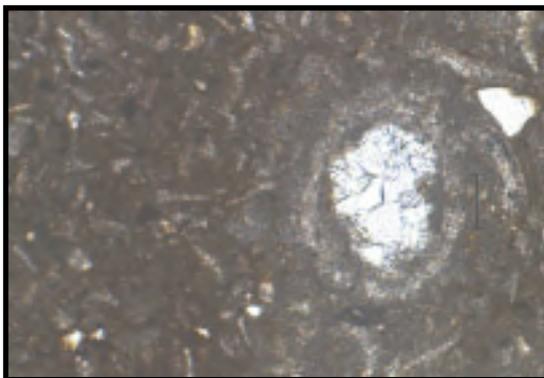
El cemento es de calcita esparítica 10%, presenta un tamaño medio de 50-60 micras y unos contactos entre los cristales de tipo curvo. Se dispone principalmente en la porosidad interpartícula y móldica en mosaicos de tamaño equigranular y, accesoriamente, en mosaicos drúsicos rellenando la porosidad de fractura. La porosidad abierta supone un 3% del volumen de la roca.

Nícoles paralelos

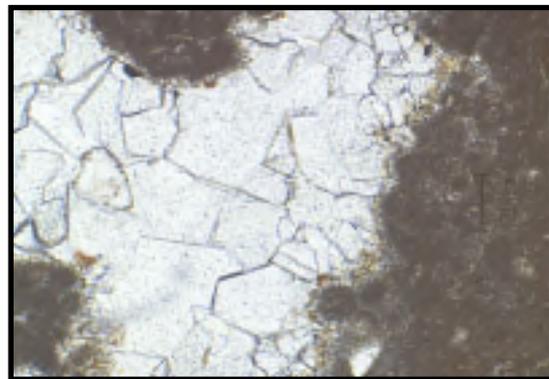
A



A'

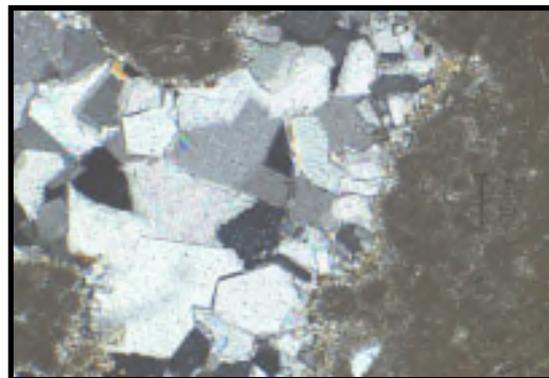


B



Nícoles cruzados

B'

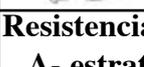
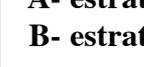


A (x4) Aspecto general de la roca. Clastos de cuarzo y bioclastos (gasterópodos, bivalvos y ostrácodos) englobados en una matriz micrítica. Escala 200 micras.

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.

Sigla: 28-Crt**Descripción de Visu:**

Macrosópicamente 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
Sigla: 28-Crt				
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	B	15,26Mpa	1,72Mpa	0,11
 C	C	15,19Mpa	1,63Mpa	0,11
				0,03
 A	Tras heladicidad A	13,52Mpa	4,89Mpa	0,36
 B	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).

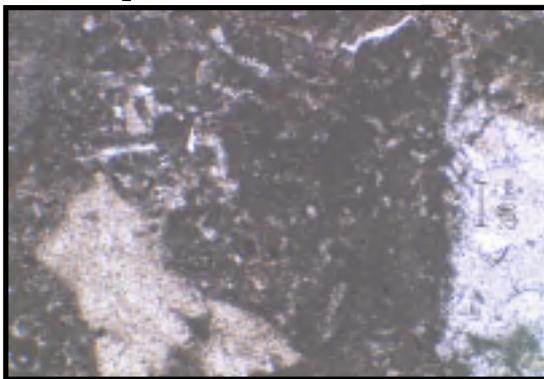
Presenta una textura granuda variable, predominantemente sostenida por la matriz, pero con zonas de textura granosostenida. Los aloquímicos son bioclastos 15% (foraminíferos y en menor proporción fragmentos de bivalvos, rudistas y corales de tamaño medio 0,2 mm) y peloides 6% de tamaño medio 0,1 mm. 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.

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.

Nícoles paralelos

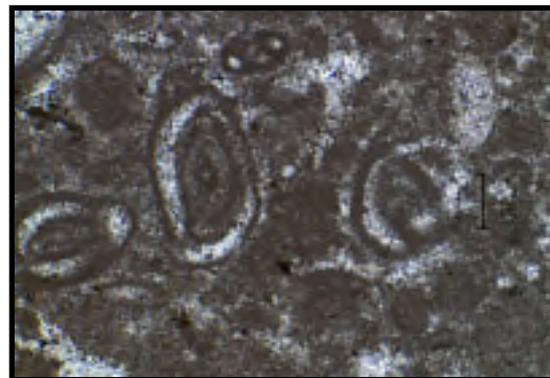
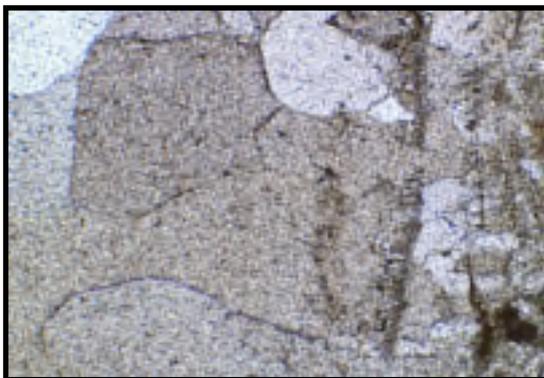
A

B



A'

B'



A-A' (x4) A 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.

Sigla: 29-A

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
Sigla: 29-A				
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	A	113Mpa	1,89Mpa	0,03
 B				
Resistencia a la flexión				
 A	A	12,04Mpa	0,80Mpa	0,33
 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 cristalino clasificado como un Sparstone (Wright 1992).

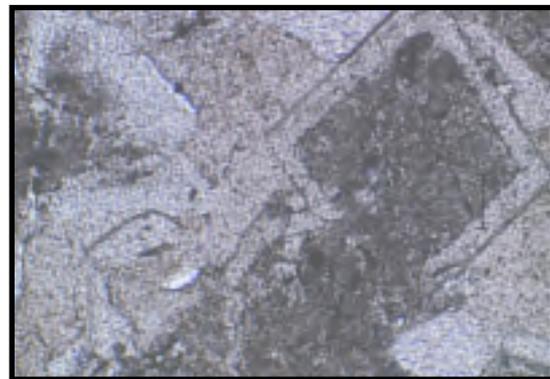
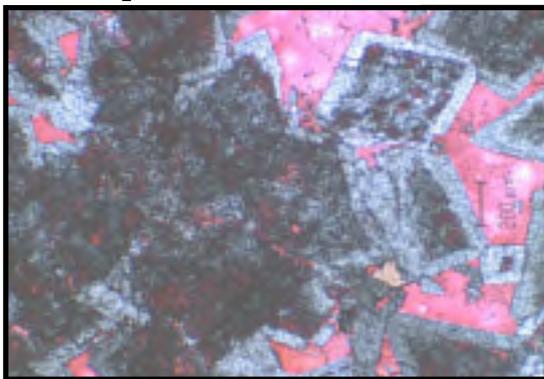
La roca estudiada no presenta restos de la textura original, que ha sido borrada durante la diagénesis por los procesos de dolomitización-desdolomitización. La textura predominante es de mosaico hipidiotópico (planar S) de cristales subeuhedrales con algunos cristales euhedrales y con límite entre los 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 dolomitización 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 prácticamente total (90%). Esta desdolomitización ha comenzado en los núcleos de los romboedros 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.

Nícoles paralelos

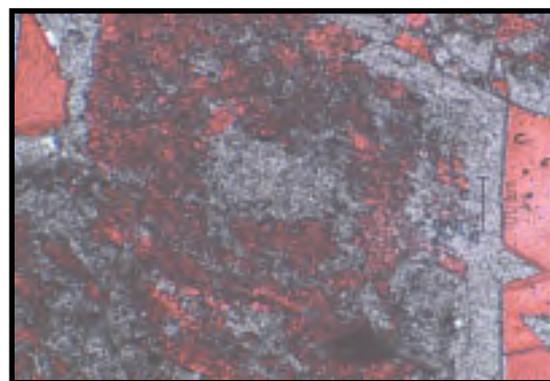
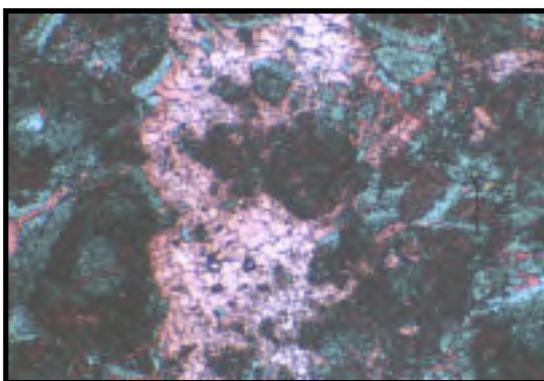
A

B



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.

Sigla: 30-D

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
Sigla: 30-D			
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 ostrácodos 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 cristallino, 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.

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.

Nícoles paralelos

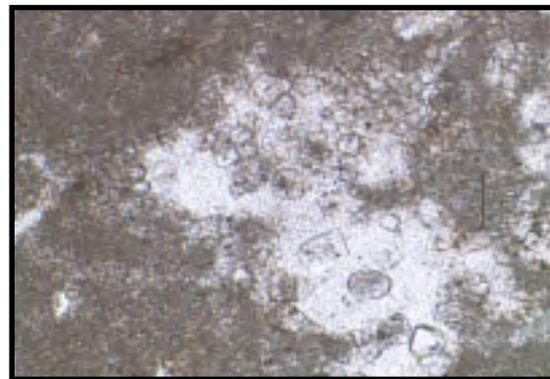
A



A'



B



B'

Nícoles cruzados

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

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

Sigla: 31-B11

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 bioturbación 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
Sigla: 31-B11			
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  B	A	77,42Mpa	
Resistencia a la flexión			
 A  B  C	A	11,36Mpa	
Colorimetría	L* 76,6	a* 2,4	b* 9,5

Sigla: 31-B12

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.

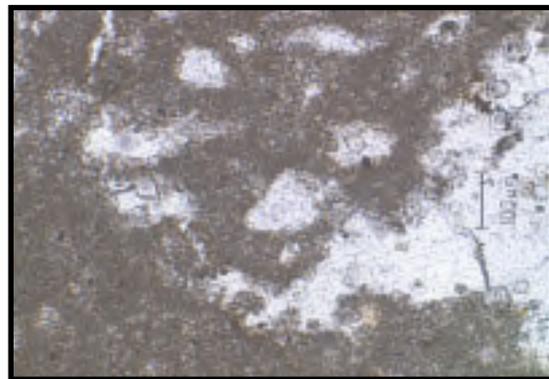
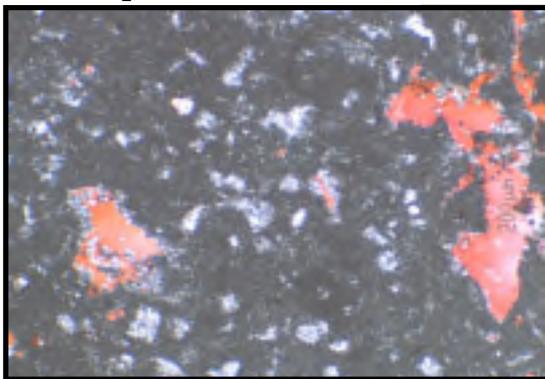
En la roca se observan como texturas relictas fantasmas de bioclastos (conchas de ostrácodos 8% de 1 mm de tamaño medio), puestas de manifiesto por la heterometría de los cristales de dolomita. La roca presenta un aspecto cristalino, compuesto principalmente por cristales de dolomita micrítica de 2 micras 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 bordeando 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.

Nícoles paralelos

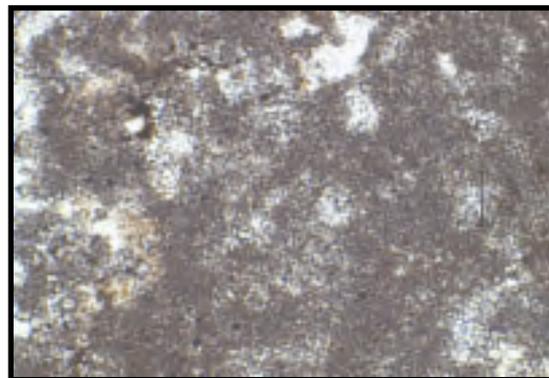
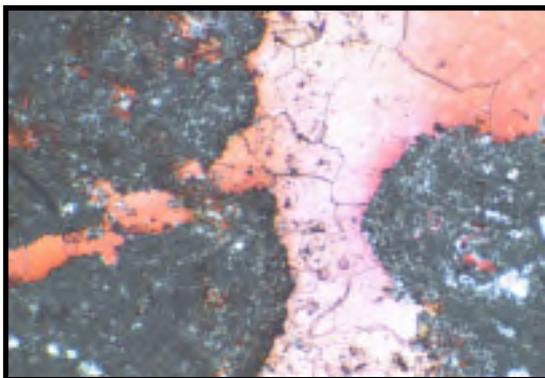
A

B



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.

Sigla: 31-B12

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	
Sigla: 31-B12					
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  B	A	56,4Mpa	61,51Mpa	0,34	1,09
	B	51,6Mpa	44,05Mpa	0,26	
Resistencia a la flexión					
 A  B  C	A	8,80Mpa	0,89Mpa	0,10	0,03
	B	8,63Mpa	0,91Mpa	0,10	
	C	8,86Mpa	1,30Mpa	0,15	
	Tras heladicidad A	9,98Mpa	1,79Mpa	0,18	0,26
	Tras heladicidad B	7,61Mpa	0,96Mpa	0,13	
	Tras heladicidad C	9,39Mpa	0,66Mpa	0,07	
Resistencia al choque					
A- estratificación perpendicular	29cm	6,51cm	0,28	0,15	
B- estratificación paralela	28cm	8,45cm	0,42		
Microdureza Knoop					
A- estratificación perpendicular	878,3Mpa	0,46Mpa	0,0005	1,08	
B- estratificación paralela	952,4Mpa	0,064Mpa	0,0006		
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-B13

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.

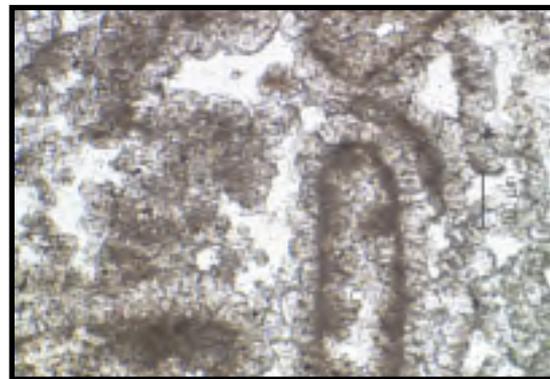
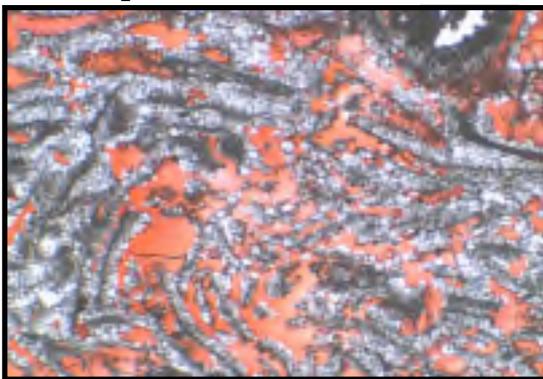
En la roca se observan, como texturas relictas, fantasmas de bioclastos, puestos de manifiesto por la heterometría de los cristales de dolomita. Los fantasmas de aloquímicos corresponden a fragmentos de conchas de bivalvos con un tamaño medio de 0,9 mm, así como a sus envueltas micríticas. La roca presenta 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 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.

Nícoles paralelos

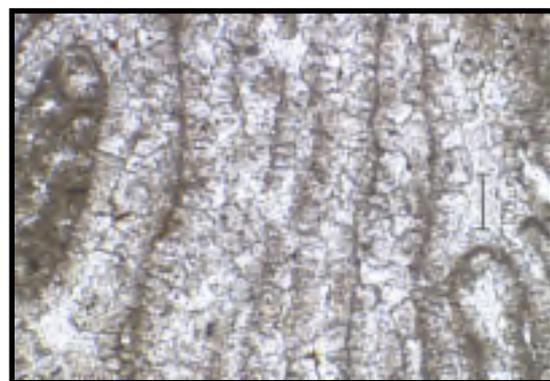
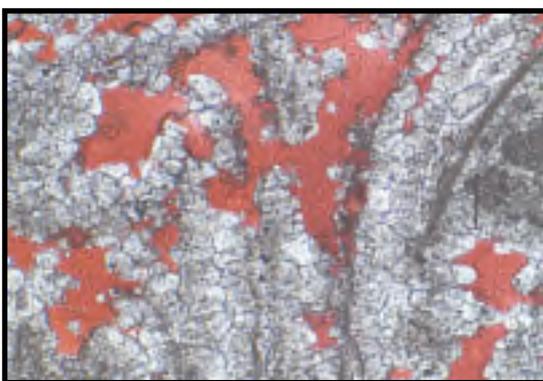
A

B



A'

B'

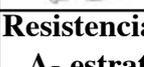
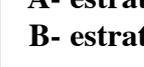


A (x4) -A' (x10) Zona teñida. Fantasmas de bioclastos puestos de manifiesto por la heterometría de cristales de dolomita englobados en cemento de calcita esparítica.

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

Sigla: 31-B13

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	A	44,3Mpa	80,72Mpa	0,57
 B	B	60Mpa	32,07Mpa	0,17
Resistencia a la flexión				
 A	A	11,76Mpa	1,71Mpa	0,14
 B	B	5,31Mpa	0,52Mpa	0,10
 C	C	6,20Mpa	0,99Mpa	0,16
 C	Tras heladicidad A	8,84Mpa	4,17Mpa	0,47
 C	Tras heladicidad B	6,28Mpa	0,69Mpa	0,11
 C	Tras heladicidad C	5,53Mpa	1,31Mpa	0,24
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 silícea, 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.

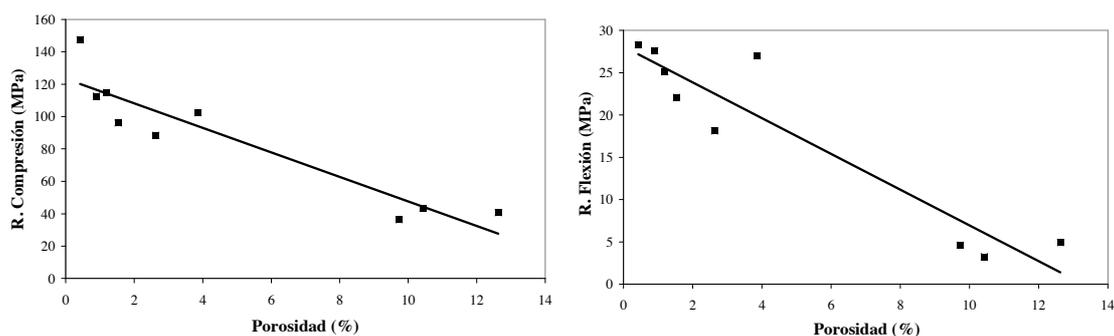


Figura V-5: Gráficos de correlación entre resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión con la porosidad abierta en arenitas.

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, mientras 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.

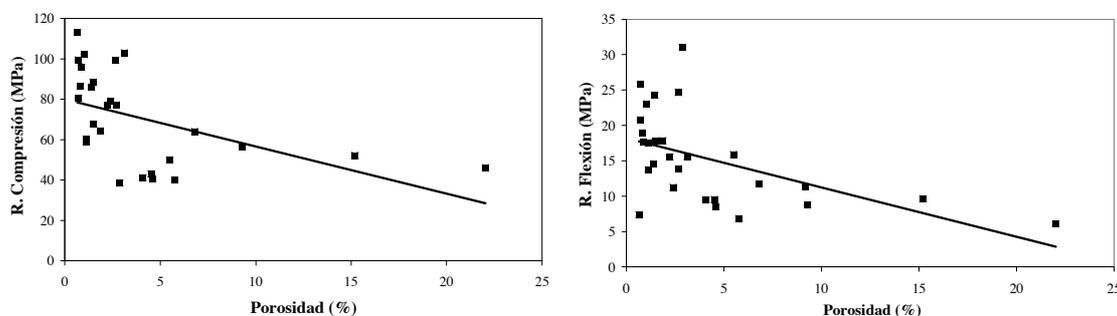


Figura V-6: Gráficos de correlación entre resistencia mecánica a compresión, y resistencia mecánica a flexión con la porosidad.

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.

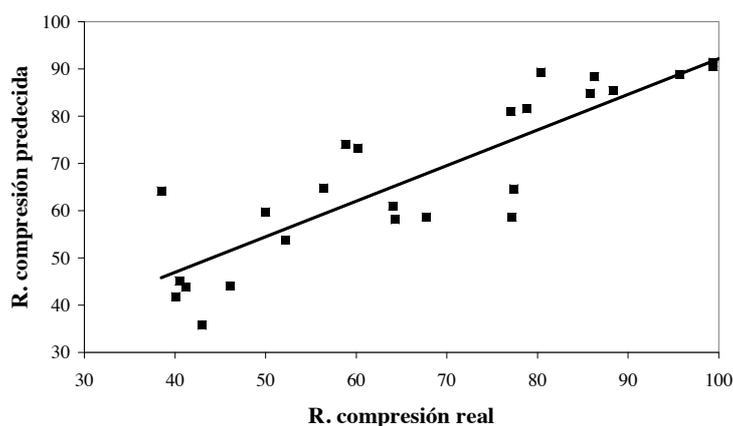


Figura V-7: Gráfica de correlación entre resistencia mecánica a compresión real y la predecida por análisis de correlación múltiple.

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.

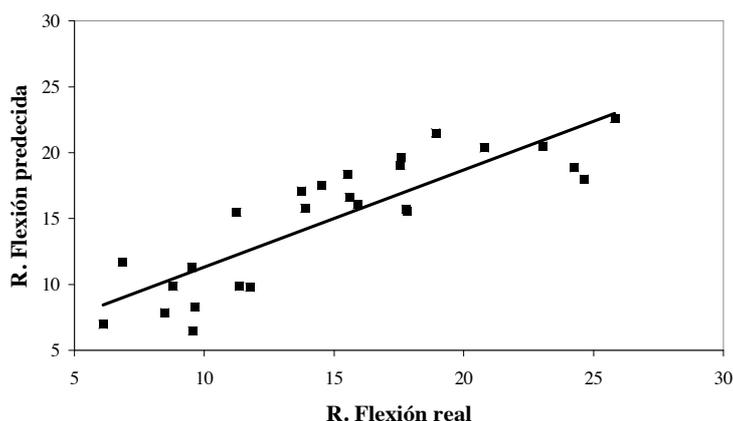


Figura V-8: Gráfica de correlación entre resistencia mecánica a flexión real y la predecida por análisis de correlación múltiple.

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 calcícticos. 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-B13	6,80	64,01
31-B11	9,19	77,42
31-B12	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 biomicrocitas, biopelmicrocitas y pelmicrocitas (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 y 113 MPa. La caliza de Alacón es un material caracterizado por tener elevadas proporciones tanto de matriz micrítica como de cemento. La proporción de matriz es ligeramente superior a la de cemento en términos globales, pero la heterogeneidad en la distribución de estos componentes provoca que en una misma muestra nos encontremos con zonas en las que la roca se puede clasificar como una biomicrocita, con otras en las que podría ser clasificada como una bioesparita.

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

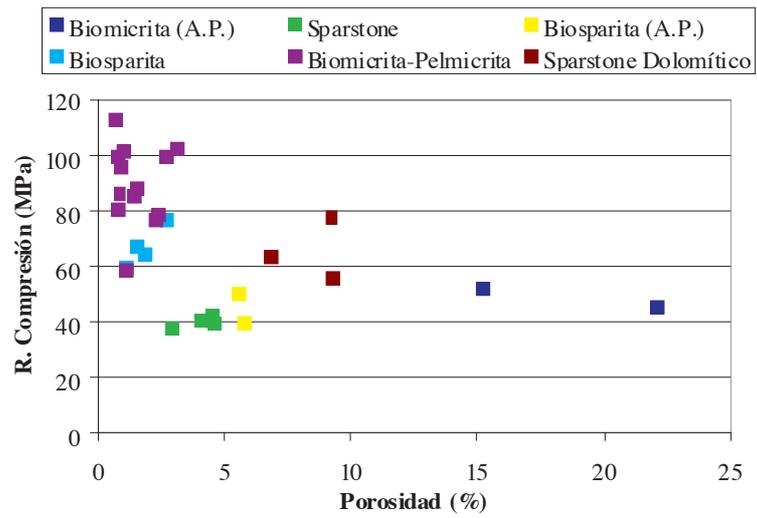


Figura V-9: Relación entre resistencia mecánica a compresión y clasificación textural de las rocas carbonatadas. A.P.: alta porosidad.

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-Mq1	95,70	17,58	0,88	41,00	5,00	54,00	0,00	0,06	0,13	0,07
24-Mq2	88,30	24,26	1,47	40,00	7,37	52,63	0,00	0,06	0,18	0,10
24-Mq3	85,80	14,53	1,40	64,95	4,12	30,93	0,00	0,06	0,16	0,05
24-Mq4	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-Crt	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 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 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-B12, 31-B13, 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.

Coeficiente 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-B12, 31-B13

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 solicitaciones estándar.

Rocas Carbonatadas

Tabla V-14b: Valores de H_0 en las biomicritas.

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-B12	0,628	0,982	0,123	3,7E-20	0,567
31-B13	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 isótropos a anisótropos 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 materia, 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.

V.3.4.1.- 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-Al, 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-B11-2-3.

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.

V.3.4.2.- 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.

V.3.4.3.- 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).

<u>Resistencia compresión</u>	<u>Uso</u>
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-B11-2-3.

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

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

Biomicrocritas >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, biomicrocritas 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%, biomicrocritas 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:

<u>P(kN)</u>	<u>Usos</u>
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).

V.3.4.4. Discusión y resultados.

Para estas baldosas tipo, se ha realizado una clasificación del material atendiendo a su espesor mínimo para cumplir las solicitudes 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.

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

Rocas carbonatadas recristalizadas calcíticas: 15-Ce.

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

Arenitas <5%: 11-Ta.

Biomicroritas <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.

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

Bioesparitas >3%: 20-Mi.

Rocas carbonatadas recristalizadas calcíticas y dolomíticas: 16-VI-I, 18-VI-II, 27-Tr, 31-B11-2-3.

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 biomicroritas con porosidad inferior al 3% poseen los valores más elevados de resistencia mecánica a la flexión, mientras que las bioesparitas con porosidad inferior al 3% presentan valores intermedios. En general, las rocas recristalizadas, las biomicroritas 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.

V.3.4.5.- 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 heladizos los carbonatos calcílicos recristalizados no macroporosos (16-VI-I y 15-Ce).

Dentro del grupo de las biomicritas, 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.

<u>Usos</u>	<u>E_r (Julios)</u>
Pavimentos exteriores y edificios públicos	≥ 3
Revestimientos en exteriores, paredes verticales, pavimentos interiores de viviendas	≥ 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.

V.3.4.6.- Discusión y resultados.

Grupo 1.- Energía de rotura mayor de 3 Julios.

Biomicritas <3%: 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 28-Crt.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 18-VI-II, 27-Tr, 31-B13.

Grupo 2.- Energía de rotura comprendida entre 2,5 y 3 Julios.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 16-VI-I, 31-B12.

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.

<u>Uso</u>	<u>Desgaste por rozamiento</u>
Colectivo intenso	0-2,5 mm
Colectivo moderado	2,5-8 mm
Individual	> 8 mm

V.3.4.7.- Discusión y resultados.

Grupo 1.- Desgaste por rozamiento inferior a 2,5 mm.

Biomicrocritas <3%: 28-Crt

Rocas carbonatadas recristalizadas: 31-B13.

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-B12.

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

V.3.4.8.- Discusión y resultados.

Grupo 1.- Microdureza Knoop media.

Biomicrocritas <3%: 12-Ca1, 13-Pu.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 31-B13, 18-VI-II.

Grupo 2.- Microdureza Knoop Baja.

Biomicrocritas <3%: 12Ca-1,2, 28-Crt.

Rocas carbonatadas recristalizadas: 16-VI-I, 27-Tr, 31-B12.

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-B12, 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 biomicritas, 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

V.3.4.9.- 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.

Biomicritas <3%: 14-Al, 23-Mq1.

Biomicritas >3%: 9-Fr.

Bioesparitas <3%: 22-Ig.

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

Clase 2.- Valores de USRV comprendidos entre 45 y 35.

Biomicritas <3%: 24-Mq22.

Bioesparitas <3%: 19-No, 21-Cv1-2.

Clase 1.- Valores de USRV inferiores a 35.

Biomicritas <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.

<u>Uso</u>	<u>Anchura máxima de la huella</u>
Colectivo intenso y escaleras para tráfico colectivo	18 mm
Colectivo moderado	23 mm
Individual	28 mm
Valores mayores que los límites recomendados	>28 mm

V.3.4.10.- Discusión y resultados.

Grupo 1.- Rocas con anchura máxima de la huella de 18 mm.

Biomicroritas <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.

Biomicroritas <3%: 23-Mq1, 24-Mq21-22-23-24.

Biomicroritas >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.

Biomicroritas <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), biomicroritas 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

V.4.- Conclusiones.

-Se han encontrado, en las rocas areníticas, correlaciones estadísticamente significativas entre porosidad y propiedades ingenieriles de las rocas. El coeficiente de correlación R entre porosidad abierta y resistencia mecánica a compresión y la resistencia mecánica a flexión presenta unos valores de 0,929 y 0,939 respectivamente. 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.

-Aunque la correlación en rocas areníticas entre porosidad y resistencia mecánica a compresión y flexión es elevada, en aquellos tipos litológicos que presentan una porosidad muy baja y una escasa variación en este parámetro, como es el caso de las rocas detríticas eocenas del Pirineo navarro-aragonés, ha quedado puesto de manifiesto que las variaciones en la resistencia mecánica están fuertemente influenciadas por la mineralogía y características texturales demostrándose que la resistencia del material no sólo depende de la porosidad efectiva. Por lo tanto, la caracterización petrográfica aporta una importante información para el estudio de la durabilidad y resistencia de los materiales pétreos de usos constructivos. El estudio estadístico realizado indica una relación lineal y directamente proporcional entre la resistencia mecánica a compresión y a flexión con el porcentaje de cemento y una relación lineal e inversamente proporcional con el porcentaje de fragmentos de roca.

-El análisis estadístico realizado para las rocas carbonatadas muestra que la resistencia mecánica está estrechamente relacionada con sus características texturales. 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. Estos modelos son estadísticamente significativos ($R= 0,86$) y pueden ser usados para la predicción de la resistencia mecánica en rocas carbonatadas.

-Los parámetros petrográficos que determinan la resistencia a la compresión simple del material son la porosidad y el porcentaje de cemento, mientras que los parámetros petrográficos que determinan la resistencia a la flexión del material son la porosidad, el porcentaje de cemento y el porcentaje de matriz. Estos parámetros se han seleccionado mediante reglas estadísticas y criterios petrológicos (teniendo en cuenta el significado físico de las variables petrográficas).

-Existe una buena relación entre resistencia mecánica a compresión con la clasificación textural y el porcentaje de porosidad en las rocas carbonatadas. Las rocas con mayores valores de resistencia mecánica a compresión son las biomicritas-biopelmicritas-pelmicritas con porosidad inferior al 3% con valores de resistencia mecánica comprendidos entre 77 y 105 MPa. Le siguen las bioesparitas con porosidad inferior al 3% con valores comprendidos entre los 60 y 77 MPa y las rocas recristalizadas dolomíticas, con valores comprendidos entre 56 y 77 MPa. Finalmente, los grupos con valores más bajos de resistencia mecánica a compresión son las biomicritas con porosidad superior al 10%, bioesparitas con porosidad superior al 5% y las rocas carbonatadas recristalizadas de composición calcítica. Estos grupos presentan valores de resistencia a compresión comprendidos entre 46 y 52, 40 y 50 y 38 y 42 MPa respectivamente.

-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 se comportan de manera isótropa respecto a los ensayos de resistencia a compresión y de resistencia al desgaste por abrasión, con la excepción de la arenita de Ayerbe (Ay) y respecto al ensayo de flexión, con la excepción de las arenitas de Alcañiz (Az), Fiscal (Hu) y de Pueyo de Araguás (Pa).

-En general, las rocas carbonatadas caracterizadas presentan un comportamiento isótropo 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 tienen un comportamiento isótropo, mientras que las bioesparitas y las biomicritas muestran un comportamiento 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.

-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.

-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.

-Los principales usos a los que es destinada la Piedra Natural explotada en Aragón son principalmente pavimentos (exterior e interior), revestimiento y mampostería y, en menor medida como decoración y trabajos de arte y arte funerario.

Pavimentos y revestimiento.

En general, aquellas rocas que presenten entre sus características tecnológicas la ausencia de minerales que pueden afectar a su durabilidad (tales como sulfuros, arcillas expansivas, etc.), una baja densidad de fisuras y discontinuidades, elevadas resistencias a flexión, compresión y al choque y una baja porosidad tendrán buenas cualidades como elemento de usos constructivos para pavimentos y revestimientos en interiores y si, además, son materiales no heladizos serán aptos para su uso en exteriores. Las limitaciones de uso para pavimentación de cada tipo litológico vienen impuestas por los valores de resistencia al deslizamiento, desgaste por abrasión y desgaste por rozamiento, mientras que las limitaciones de uso para revestimiento vienen impuestas por los valores del ensayo de carga de rotura por anclajes.

Mampostería.

Son aptas para su uso en mampostería las rocas que presentan una resistencia mecánica a compresión superior a 20 MPa, una porosidad abierta inferior al 45%, no sean heladizas y sea factible su extracción en bloques de tamaños decimétrico-métricos.

Decoración y trabajos de arte y arte funerario.

Las rocas utilizadas para decoración y trabajos de arte son generalmente las rocas ornamentales (definidas como aquellas rocas que se pueden pulir por procedimientos puramente físicos sin necesidad de añadir ningún tipo de producto químico). La elección de la piedra para su uso como material en estos campos ornamentales está basada en criterios estéticos (color, tamaño de grano, venas) y propiedades técnicas. En general, los requisitos técnicos son mucho menos restrictivos para este tipo de usos.

Clasificación tecnológica del material.

La clasificación tecnológica de los materiales pétreos de usos constructivos se ha realizado a partir de los resultados de los ensayos tecnológicos de caracterización, dividiendo las rocas caracterizadas en 7 grupos. Sin embargo, hay que tener presente las limitaciones de uso de estos materiales en función de las características de su explotación.

Grupo 1. Arenitas porosidad inferior al 5%.

Grupo 2. Arenitas porosidad superior al 5%.

Grupo 3. Biomicritas-pelmicritas porosidad inferior al 3%.

Grupo 4. Biomicritas porosidad superior al 10%.

Grupo 5. Bioesparitas porosidad inferior al 3%.

Grupo 6. Bioesparitas porosidad superior al 3%.

Grupo 7. Rocas recristalizadas carbonatadas (porosidad 3-10%).

Grupo 1. Arenitas porosidad inferior al 5%. (1-Ye, 2-Ma, 3-En, 4-Hu, 5-Pa, 11-Ta).

Cumplen las solicitaciones más restrictivas respecto a los ensayos de resistencia mecánica a compresión, resistencia mecánica a flexión y resistencia al deslizamiento. Respecto al ensayo de resistencia mecánica a la abrasión los resultados obtenidos están en función de la proporción de clastos de cuarzo, clastos calcílicos y clastos dolomíticos, e indican que todas las rocas de este grupo, excepto la arenita 3-En, son aptas para pavimentación con usos colectivos. Estas rocas son no heladizas, por lo que pueden ser utilizadas tanto en exterior como en interior. Estos materiales no admiten un acabado pulido.

Usos: Aptas para su uso como material para pavimentación tanto interior como exterior 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. Arenitas porosidad superior al 5%. (6-Un, 7-Ay y 10-Az).

Presentan unos valores de resistencia mecánica a compresión y flexión medio-bajos. Respecto al ensayo mecánico de deslizamiento sin pulimento cumplen holgadamente las solicitaciones más restrictivas y respecto al ensayo de resistencia al desgaste por abrasión presentan un comportamiento variable, siendo la arenita de 10-Az la que presenta un mejor comportamiento frente a este ensayo derivado de su baja relación calcita/dolomita y calcita/cuarzo. Estas rocas son no heladizas, por lo que pueden ser utilizadas tanto en exterior como en interior y no admiten un acabado pulido.

Usos: Aptas para su uso en mampostería, presentan un elevado valor industrial como piedras de cantería, consecuencia de unos valores medios de resistencia mecánica que les permiten satisfacer requerimientos de esfuerzos verticales y por su facilidad tanto para dimensionarlas como para su extracción en cantera (Buj *et al.*, 2007).

La arenita 10-Az es apta para ser utilizada en pavimentación tanto interior como exterior en zonas con tránsito peatonal colectivo moderado. Las arenitas 6-Un y 7-Ay serían aptas para su uso en pavimentación en zonas con tránsito peatonal o de vehículos ligeros según el ensayo de resistencia a compresión, pero los datos obtenidos por el ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, especialmente en la arenita de 7-Ay, desaconsejan su uso.

Grupo 3. Biomicritas-Pelmicritas porosidad inferior al 3%.

Cumplen las solicitaciones más restrictivas de tipo mecánico respecto de los ensayos de resistencia mecánica a compresión y resistencia mecánica a flexión. Estas rocas son no heladizas, salvo 24-Mq23, por lo que pueden ser utilizadas tanto en interior como en exterior.

La idoneidad de su uso se ha evaluado con diferentes ensayos en función de su uso predominante.

A) Biomicritas uso ornamental: 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 28-Crt y 29-A.

Usos: Aptas para su uso en revestimiento, mampostería, pavimentación tanto interior como exterior con todo tipo de tránsito tanto peatonal (usos colectivos moderados o intensos) 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) Biomicritas usos cantería y lajas: 14-Al, 23-Mq1, 24-Mq21-22-23-24 y 25-Pm.

Usos: Aptas para su uso en mampostería (salvo 24-Mq23). Estas biomicritas presentan un comportamiento variable respecto a los ensayos de resistencia al deslizamiento y resistencia al desgaste por abrasión. En función del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión estas rocas, excepto 14-Al, serían aptas para usos colectivos. Debido a las restricciones que implica el ensayo de resistencia al deslizamiento, 14-Al y 23-Mq1 serían aptas para uso en zonas tanto secas como húmedas con cualquier tipo de pendiente, mientras que 24-Mq2 y 25-Pm sólo serían aptas para zonas interiores secas con pendientes inferiores al 6%.

Grupo 4. Biomicritas porosidad superior al 10%. (8-Tu, 9-Fr).

Presentan unos valores de resistencia mecánica a compresión y flexión medio-bajos. Respecto a los ensayos mecánicos de resistencia al deslizamiento sin pulimento cumplen holgadamente las solicitaciones más restrictivas. Estas rocas son no heladizas, por lo que pueden ser utilizadas en exteriores. Estos materiales no admiten un acabado pulido.

Usos: Aptas para su uso en mampostería y para pavimentación, tanto exterior como interior, en zonas con usos colectivos moderados y con tránsito de vehículos ligeros. Las biomicritas porosas al igual que las arenitas miocenas presentan un notable valor industrial como piedras de cantería consecuencia de presentar unos valores medios de resistencia mecánica que les permiten satisfacer requerimientos de esfuerzos verticales y presentar una relativa facilidad para su extracción en cantera y su posterior dimensionado.

Grupo 5. Bioesparitas porosidad inferior al 3%. (22-Ig, 26-No, 21-Cv).

Cumplen las solicitaciones más restrictivas de tipo mecánico respecto de los ensayos mecánicos de resistencia a compresión y resistencia a flexión. Respecto al ensayo mecánico de deslizamiento sin pulimento presentan un comportamiento variable. Estas rocas son no heladizas.

Usos: Aptas para su uso en mampostería y revestimiento tanto interior como exterior por tratarse de rocas no heladizas. También son aptas para su uso en pavimentación en zonas con usos colectivos moderados. La roca 22-Ig es apta para su uso tanto en interiores como en exteriores en zonas secas y húmedas, mientras que las rocas 19-No y 21-Cv1-2 son aptas únicamente en zonas interiores secas y húmedas con pendientes inferiores al 6%. Estos materiales admitirían un acabado pulido.

Grupo 6. Bioesparitas porosidad superior al 3%. (19-To, 20-Mi).

Presentan unos valores de resistencia mecánica a compresión y flexión medio-bajos. Respecto al ensayo mecánico de deslizamiento sin pulimento cumplen holgadamente las solicitaciones más restrictivas y respecto al ensayo de resistencia al desgaste por abrasión presentan un comportamiento variable. Estas rocas son no heladizas.

Usos: Aptas para su uso en mampostería, revestimiento y pavimentación tanto interior como exterior por tratarse de rocas no heladizas, en zonas con usos colectivos moderados tanto secas como húmedas con cualquier porcentaje de pendiente. Estos materiales admitirían un acabado pulido.

Grupo 7. Rocas recristalizadas carbonatadas (porosidad 3-10%). (15-Ce, 16-VI-I, 17-CF, 18-VI-II, 27-Tr, 30-D y 31-BI).

Las rocas carbonatadas recristalizadas 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 mecánica 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 no heladizas, excepto 16-VI-I y 15-Ce.

Usos: Aptas para su uso en revestimiento y mampostería. Estos materiales 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 con usos colectivos intensos tanto exteriores como interiores (31-BI1-3) y usos colectivos moderados en interiores (31-BI2). Por su parte, las rocas recristalizadas de composición calcítica son únicamente aptas para zonas con tránsito de vehículo ligeros y zonas interiores con usos colectivos moderados.

-Esta clasificación tecnológica presenta una serie de limitaciones derivadas de las características de las explotaciones, en especial, del tamaño de bloque máximo que se puede extraer en cantera, que es el que va a determinar los posibles usos del material.

-Las arenitas 11-Ta y 4-En, la biomicrota 25-Pm y las bioesparitas 22-Ig, 20-Mi, 21Cv1-2, 26-No y 19-To solo se comercializan como lajas debido a su modo de explotación. Se explotan únicamente los 2 metros superficiales que presentan un lajado natural por meteorización y que implica un desplazamiento espacial del laboreo y el arrasamiento de grandes superficies. La estabilización de los frentes de explotación permitiría la extracción de bloques de mayores dimensiones que posibilitarían el uso de estos materiales como piedra dimensionada, como se ha realizado con las biomicrotas de 14-Al, 23-Mq1 y 24-Mq21-22-23-24. Estos nuevos usos de la piedra natural implican un mayor valor añadido sobre las lajas.

-Las explotaciones tanto de las piedras de cantería como de las rocas ornamentales se caracterizan por presentar importantes frentes de cantera que en algunos casos llegan a alcanzar potencias superiores a la decena de metros.

-Los materiales comercializados como piedras de cantería son las arenitas 1-Ye, 2-Ma, 4-Hu, 5-Pa, 6-Un, 7-Ay y 10-Az y las biomicritas con porosidad superior al 10% 8-Tu y 9-Fr. Los usos principales de estos materiales son la mampostería y la pavimentación en exteriores en el caso de las arenitas y pavimentación en exteriores e interiores en el caso de las biomicritas. Como consecuencia de las nuevas tendencias del mercado, estos materiales presentan un nuevo uso en la actualidad como revestimiento de fachadas y pavimentación con acabados de tipo rústico.

-Los materiales comercializados preferentemente como roca ornamental son las biomicritas 12-Ca1-2-3, 13-Pu, 28-Crt y 29-A y las rocas recristalizadas 16-VI-I, 17-CFI-S, 18-VI-II, 27-Tr, 30-D y 31-B11-2-3. La principal diferencia de estas rocas con los grupos anteriores es que admiten un acabado superficial de tipo pulido. Esta característica le confiere al producto final un mayor valor añadido. Los principales usos de estos materiales son pavimentación, revestimiento, decoración y trabajos de arte derivados de sus características estéticas y de sus propiedades técnicas. Estos materiales, además de ser comercializados preferentemente como rocas ornamentales, también se comercializan ocasionalmente como piedras de cantería.

CAPÍTULO VI.- CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA DE LA ROCA FRESCA

CAPÍTULO 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-Pelmicritas 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-B11, 31-B12 y 31-B13.

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	Color
Biomicrocritas porosidad superior al 10%.	
Biomicrocritas-Pelmicritas porosidad inferior al 3%.	
Rocas recristalizadas carbonatadas (porosidad 3-10%)	
Arenitas porosidad superior al 5%.	

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 anisótropos (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).

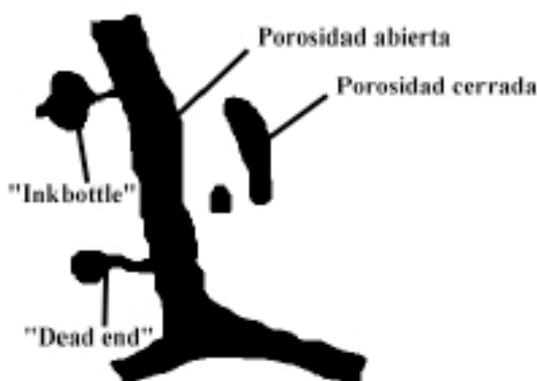


Figura VI-1: Porosidad abierta y porosidad cerrada en una representación en 2D (modificada de Bourguès, 2006).

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).

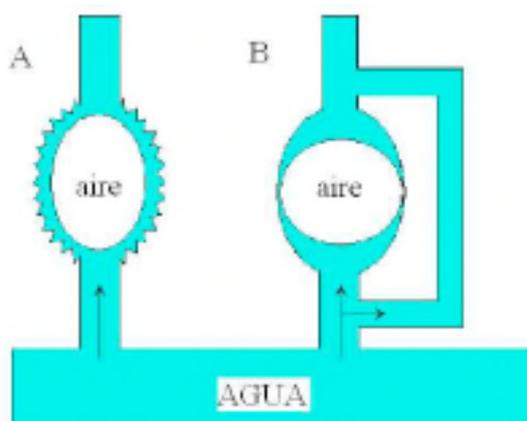


Figura VI-2: Modelos de aire atrapado durante los procesos de absorción capilar. a.: rugosity; b.: "bypass" (tomado de Bousquie, 1979).

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.

VI.2.1.- 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 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.

Tabla VI-1: Composición mineralógica (expresada en porcentaje) y parámetros petrográficos de las rocas detríticas (Q-cuarzo, Fio-feldespato, Ox Fe-Óxidos de hierro).

	Clastos Q (%)	Clastos Fio (%)	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 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 convexos	Subangulosos-subredondeados	
10-Az	29,96	2,72	17,98	4,23	45,11 (4,0;74,7; 21,3)	0,32	9,73	1,2-1,4 convexos	Subangulosos-subredondeados	

Tabla VI-2: Composición mineralógica (expresada en porcentaje) y parámetros petrográficos de las rocas carbonatadas (Q-cuarzo).

	Porosidad (%)	Matriz Micrítica (%)	Dolo-Micrítica (%)	Tamaño micrítica (µm)	Micro-Esparita calcítica (%)	Dolo-Micro esparita (%)	Tamaño microesparita (µm)	Tamaño cristales (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					3,08		40	29,91			2,25	300	100
9-Fr	15,2	76,92		<1					8,79		50	13,19			1,1	400	60
12-Ca	0,82	21,63		<1					4,32		150	49,39	22,56		2,1	70	60
13-Pu	2,66	40,7		<1		10,17			8,31		300	10,3	20,35	10,17	<1	480	270
28-Crt	3,12	50,59		<1					10,07		60	30,52			8,83	320	140
29-A	0,65	51,78		<1					27,18		100	14,56	6,47			170	60
16-VI-I	4,51				47,19		25		52,81		230				<1		130
17-CHI	3,26				69,33		15		17,13		125	13,54					36
17-CFS	8,54				42,36		15		40,17		90	17,47					52
18-VI-II	4,6	8,31		1	48,85		17		42,85		70						40
27-Tr	4,09				80,86		15		19,14		60						20
30-D	3,43							400	89,83	10,17	250						300
31-BI1	9,19			2					10,99		200						30
31-BI2	9,3			2					9,06		250						30
31-BI3	6,8			2					13,68	7,16	150						50

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.

VI.2.2.- Discusión y resultados.

Tabla VI-3: 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-B11	0,19	0,96	45,03	1,20
31-B12	0,33	1,29	44,77	2,01
31-B13	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-UN	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-Crt	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-VI-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-VI-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-BI1	0,371	37,028	0,146	0,048	16,004	< LLD	< LLD	0,021	0,646	0,008	45,190	99,462
31-BI2	0,727	32,710	0,293	0,101	18,877	< LLD	< LLD	0,016	1,255	0,028	45,560	99,567
31-BI3	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 SiO₂ 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-B12) 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 Na₂O y K₂O (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-B11), Blancas Jaspe (31-B12), Blancas Moka (31-B13), Puebla de Albortón (13-Pu) y dolomía de Abanto (30-D).

Los porcentajes mayores de Fe₂O₃ se corresponden con las rocas con mayores cantidades de sílice: Calatorao (12-Ca) y Crema Teruel (28-Crt).

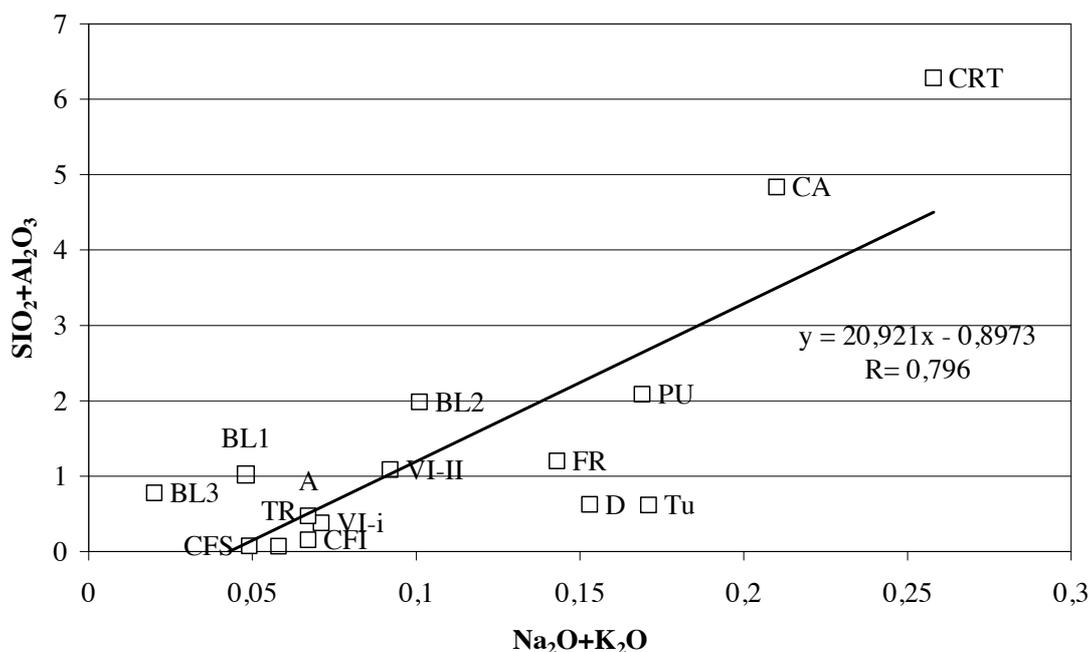


Figura VI-3: Relación entre la suma de sílice y alúmina frente a sodio más potasio expresados en porcentaje en peso de óxidos.

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.

VI.3.1.- Discusión y resultados.

Tabla VI-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-B11	0,49	17,32	17,81	0,5	(0,599) 1,27	0,6-0,5	1-0,9	
31-B12	0,14	10,80	10,94	0,35	(1,205) 1,60	0,2-0,15	2-1,5	
31-B13	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 $0,0057 \mu\text{m}$.

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-B11, 31-B12, 31-B13), 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 $0,1 \mu\text{m}$. 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 recrystalizadas (17-CFI, 30-D, 31-B11 y 31-B12).

	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-B11	(0,599) 1,270	3,80%	6,95%	83,08%	4,17%	2,10%	0,6-0,5	
31-B12	(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 recrystalizadas (16VI-I y 31-B13) 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-B13	(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:

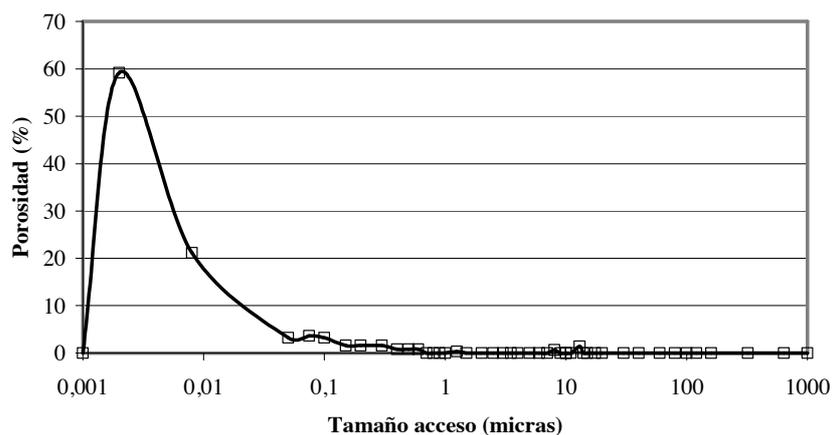
Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por una distribución unimodal de los tamaños de acceso de poro (figura VI-4). Esta distribución porométrica la tienen las biomicritas con porosidad inferior al 3% (12-Ca, 13-Pu y 28-Crt), la biomicrita con porosidad superior al 10% (8-Tu) y las rocas carbonatadas recrystalizadas (30-D y 31-B11). 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-B11.

	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-B11	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

12-Ca



8-Tu

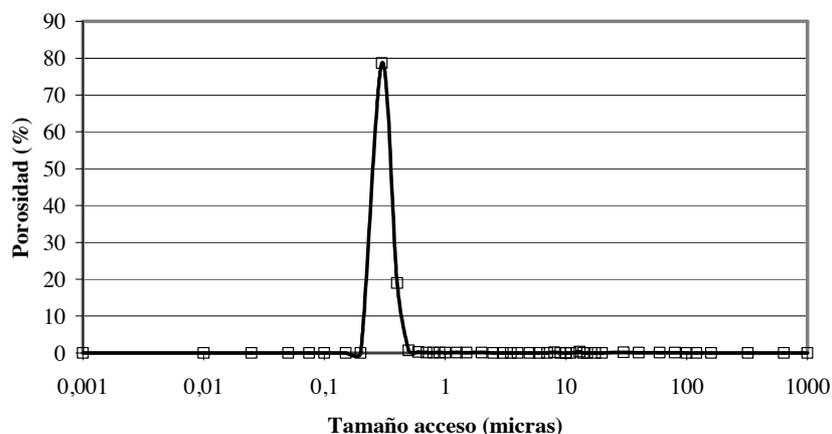


Figura VI-4: Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo A.1 (12-Ca) y del grupo A.2 (8-Tu).

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 presentan la biomicrota con porosidad inferior al 3% (29-A), la biomicrota 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

9-Fr

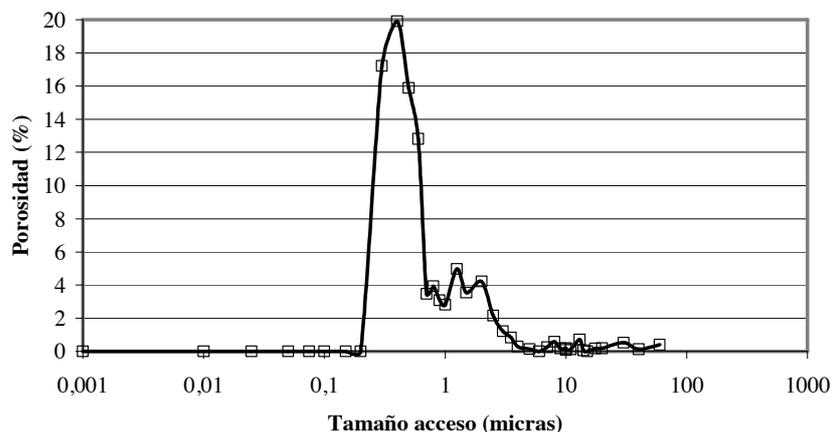


Figura VI-5: Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo B (9-Fr).

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-B12 y 31-B13) 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-B12	1,600	0,00%	8,95%	75,27%	14,72%	1,06%	0,2-0,15	1-0,9	
31-B13	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

31-B13

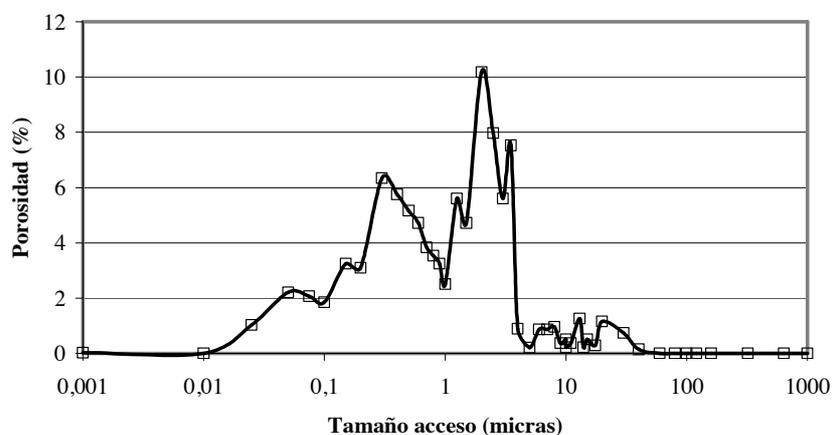


Figura VI-6: Ejemplo de distribución porométrica de las rocas del grupo C (31-B13).

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.

VI.3.2.- 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 $8,30 \mu\text{m}$ y $8,94 \mu\text{m}$ respectivamente, mientras que la arenita de Alcañiz presenta un tamaño de poro medio de $7,14 \mu\text{m}$. Las tres rocas alcanzan unos valores similares para sus máximos, siendo de $10-15 \mu\text{m}$ en 6-Un y de $5-10 \mu\text{m}$ 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 $10-15 \mu\text{m}$ hasta tamaños de poro de $50-55 \mu\text{m}$.

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 $5-10 \mu\text{m}$ hasta tamaños de poro de $60-65 \mu\text{m}$.

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.

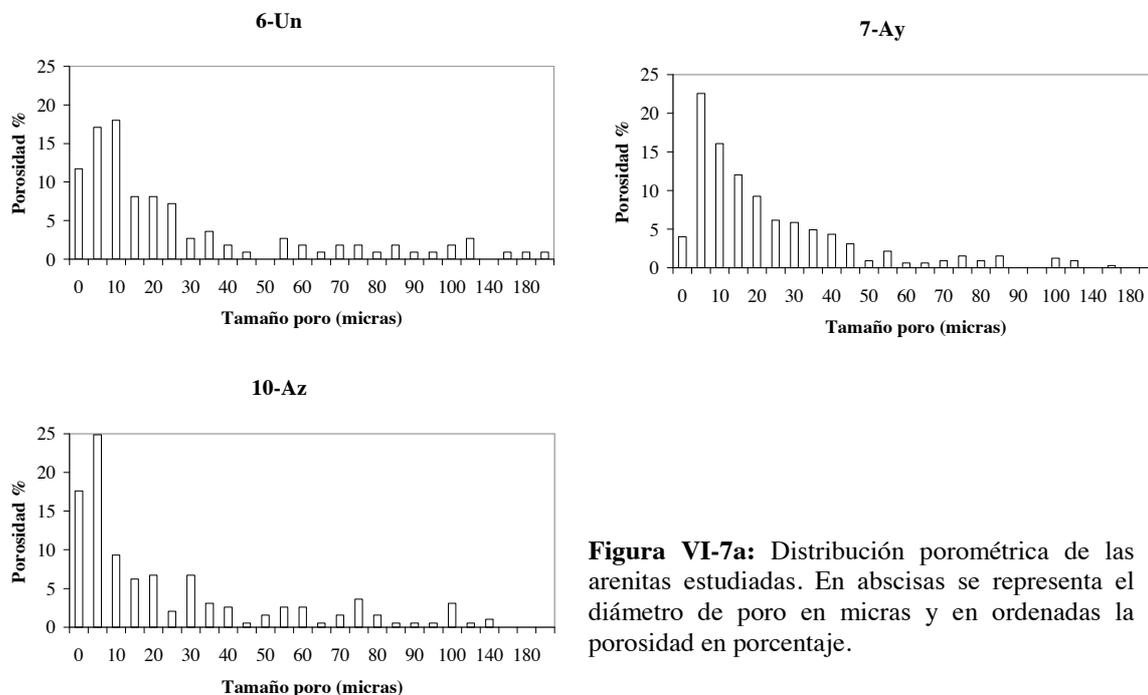


Figura VI-7a: Distribución porométrica de las arenitas estudiadas. En abscisas se representa el diámetro de poro en micras y en ordenadas la porosidad en porcentaje.

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).

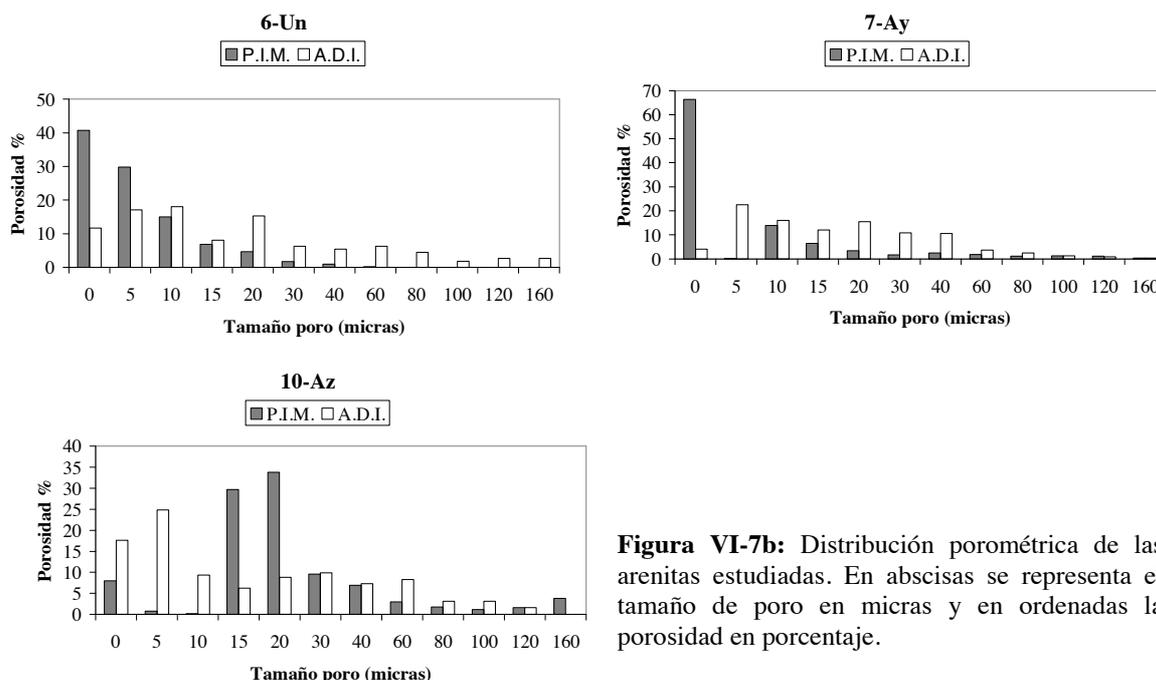


Figura VI-7b: Distribución porométrica de las arenitas estudiadas. En abscisas se representa el tamaño de poro en micras y en ordenadas la porosidad en porcentaje.

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 siendo 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_{rph} , 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_1 , S_{24} , S_{48} , T_{W25} , T_{W50} , T_{W75} , T_{W100} , W_{cri} , 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).

$$\rho_b = [m_d / (m_s - m_h)] \times \rho_{rh}$$

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_{rh} 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):

$$\rho_{rph} = [m_d / (m_d - m_h)] \times \rho_{rh}$$

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).

VI.4.1.1.- 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-B11, 31-B12 y 31-B13.

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/m³), densidad real método de la pesada hidrostática ρ_{rph} (Kg/m³) y porosidad abierta P₀ (%). 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-B12	3,83	1,513	0,395	2454,49	2720,67	9,3
31-B11	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-B13	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:

$$\rho_r = [m_e / (m_2 + m_e - m_1)] \times \rho_{rh}$$

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_{rh} es la densidad del agua (Kg/m³).

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/m³) y ρ_r es la densidad real de la probeta (Kg/m³).

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.

$$P_{in} = P - P_0$$

donde **P** es la porosidad total de la probeta (%) y **P₀** es la porosidad abierta de la probeta (%).

VI.4.1.2.- 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-B11, 31-B12 y 31-B13 (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 gr/cm³ (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 (Kgr/m³), 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_{cri})

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.

VI.4.1.3- 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:

Biomicroritas porosidad superior al 10%: 8-Tu y 9-Fr.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 16-VI-I, 17-CFS y 31-B11-2-3.

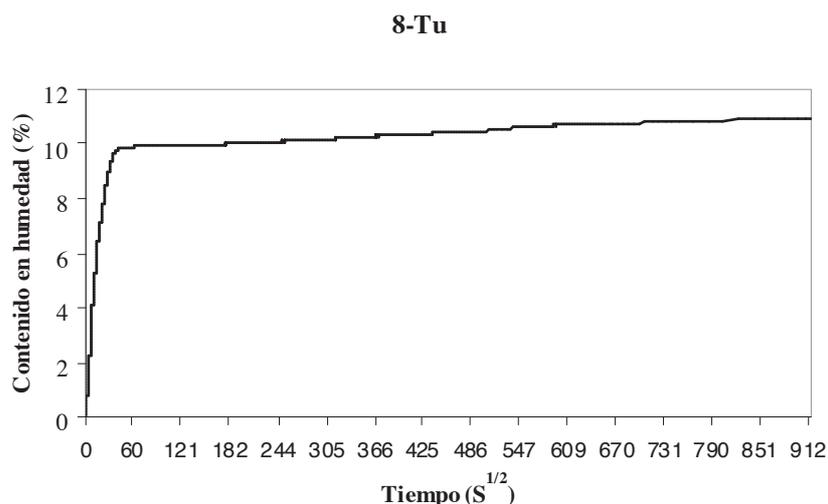


Figura VI-8: Curva de absorción libre de agua en la roca 8-Tu. (Grupo A).

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.

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:

Biomicroritas-pelmicroritas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 27-Tr y 30-D.

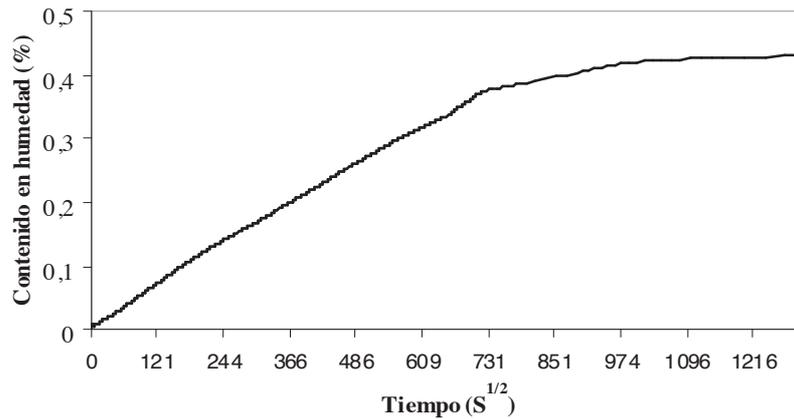
12-Ca

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.

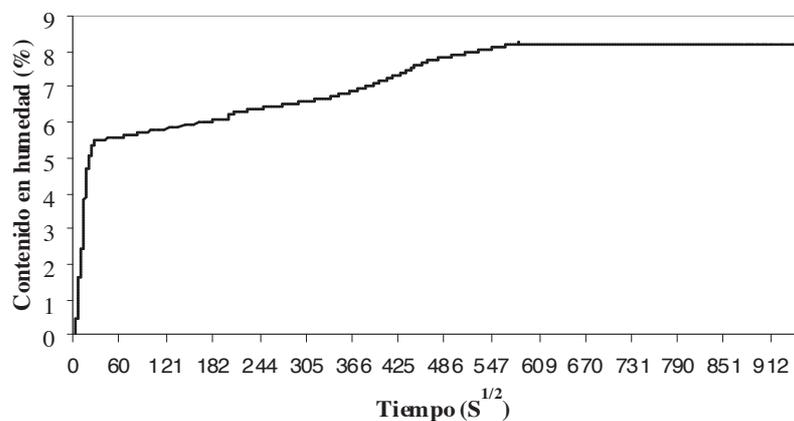
6-Un

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.

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 de 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

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.

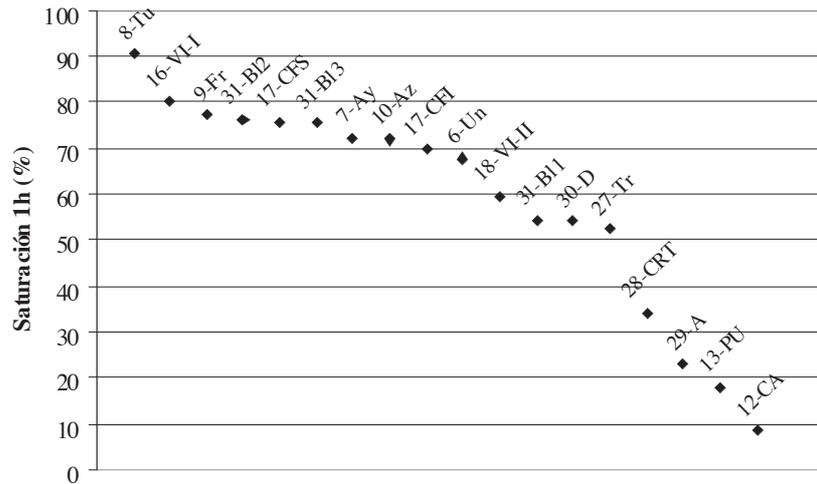


Figura VI-11: Rocas ordenadas en función del grado de saturación en 1 hora (S_1).

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 electroestáticas. 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:

Biomicroritas 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-B11-2-3

Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

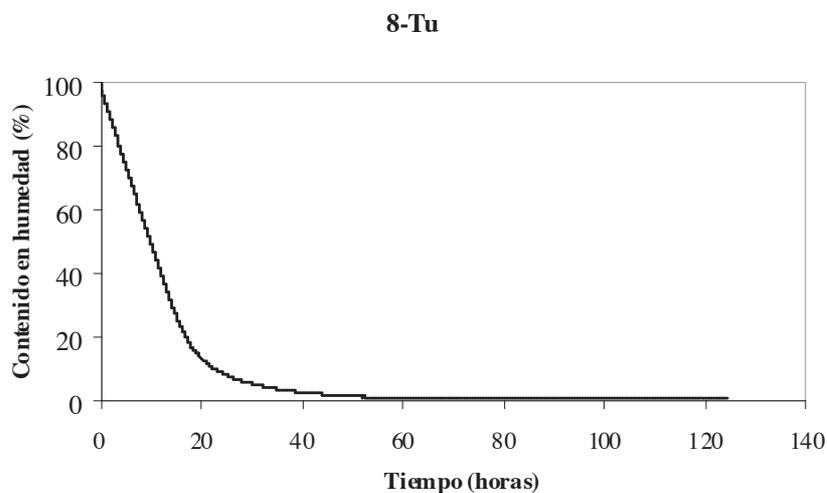


Figura VI-12: Curva de evaporación en la roca 8-Tu (grupo A).

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:

Biomicroritas-pelmicroritas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 29-A y 28-Crt.

13-Pu

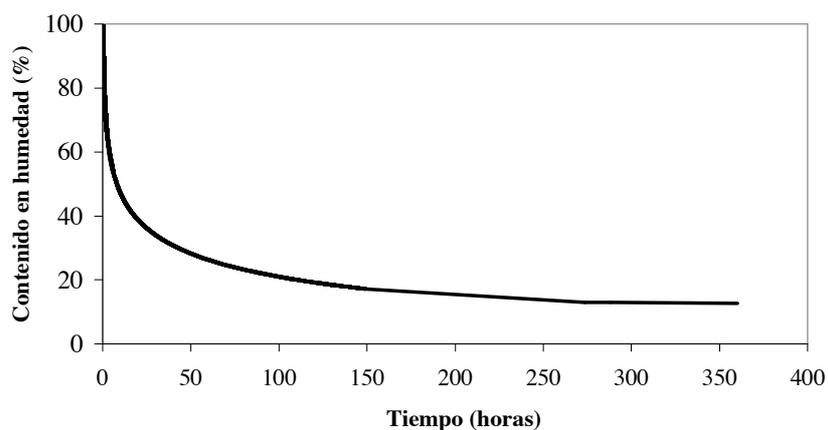


Figura VI-13: Curva de evaporación en la roca 13-Pu (grupo B).

Los parámetros calculados a partir de las gráficas de desorción continua se muestran en la tabla VI-12.

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-B13	2,65	23,52
30-D	2,71	38,52
31-B11	5,06	24,68
28-Crt	5,87	59,3
31-B12	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

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.

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.

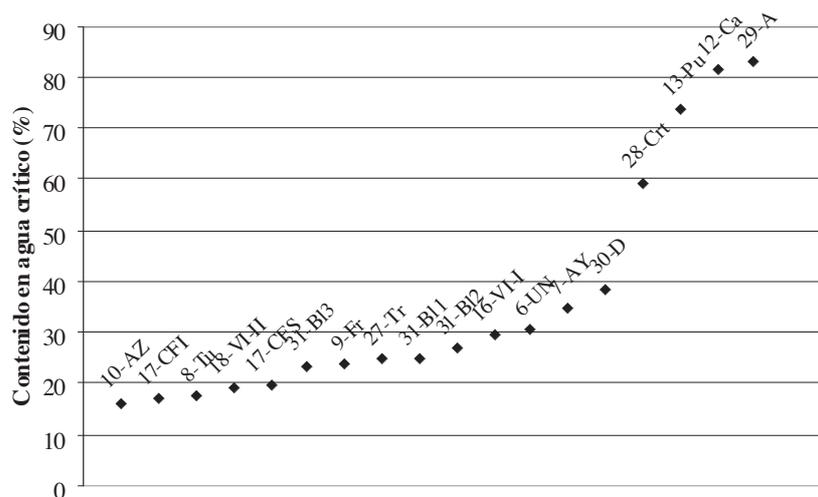


Figura VI-14: Rocas ordenadas en función del contenido en agua crítico, W_{cri} .

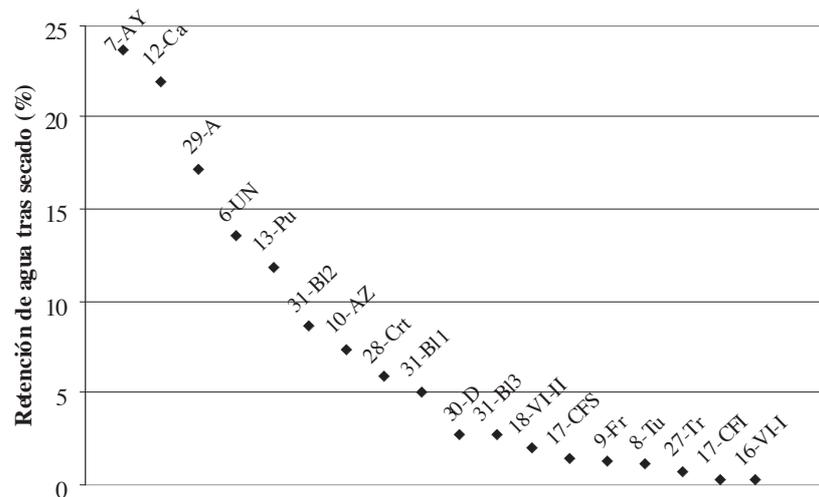


Figura VI-15: Rocas ordenadas en función de la retención de agua tras secado, W_d .

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.

$$C.A.C = (m_t - m_d) / (a \cdot t^{1/2})$$

donde m_t y $t^{1/2}$ 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).

VI.4.1.4.- 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:

Biomicroritas 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-B11, 31-B12 y 31-B13.

Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

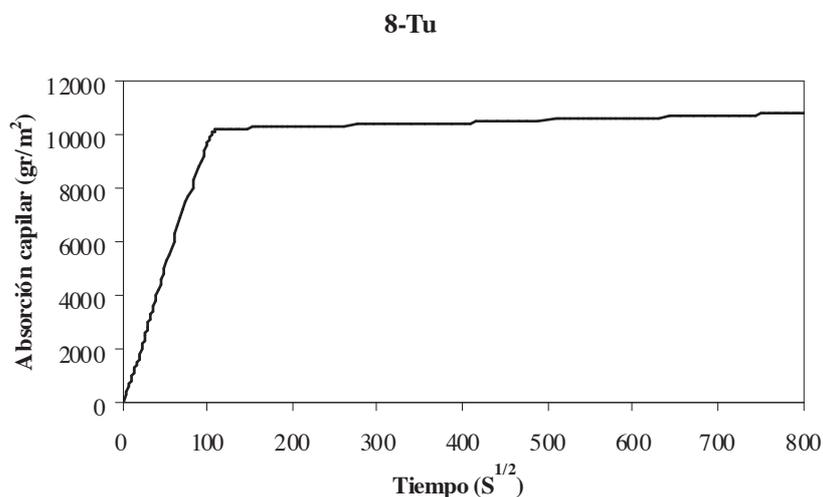


Figura VI-16: Curva de absorción capilar de 8-Tu (Grupo A).

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 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:

Biomicrocritas-pelmicrocritas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 29-A.

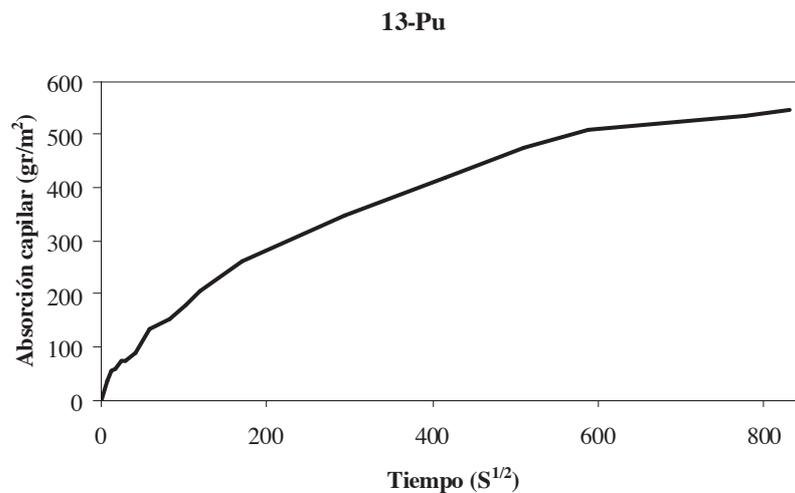


Figura VI-17: Curva de absorción capilar de 13-Pu (Grupo B).

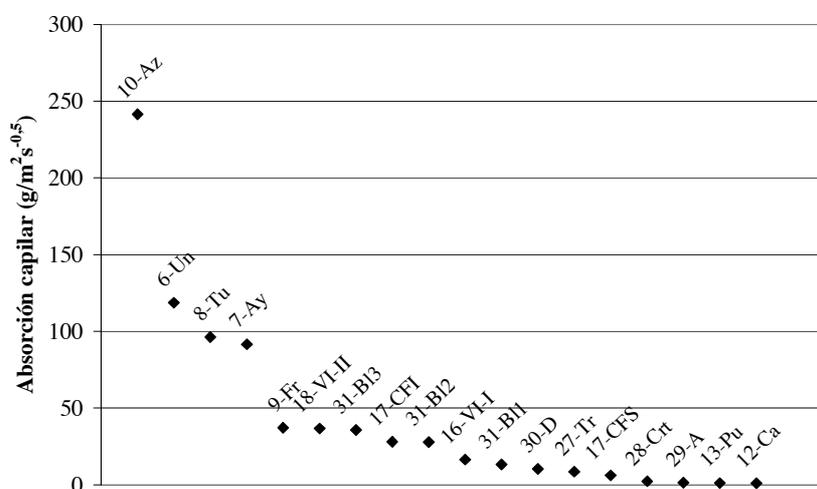
Los valores del grado de saturación capilar son elevados para las biomicrocritas con porosidad superior al 10% (8-Tu, 9-Fr) que alcanzan valores en torno al 85%, para las arenitas miocenas (10-Az, 6-Un y 7-Az) y para algunas de las rocas recristalizadas carbonatadas (16-VI-I, 31-BI, y 30-D) con valores superiores al 70%. Estos valores de S_c indican una buena intercomunicación de la red porosa. En cambio, las biomicrocritas 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 biomicritas con porosidad inferior al 3%, mientras que los valores mayores de este coeficiente corresponden a las arenitas miocenas y a las biomicritas con porosidad superior al 10%. Las rocas recristalizadas se localizan en una posición intermedia entre las biomicritas con porosidad inferior al 3% y las arenitas miocenas y biomicritas con porosidad superior al 10%.

**Figura VI-18:** Rocas ordenadas en función de su coeficiente de absorción capilar.

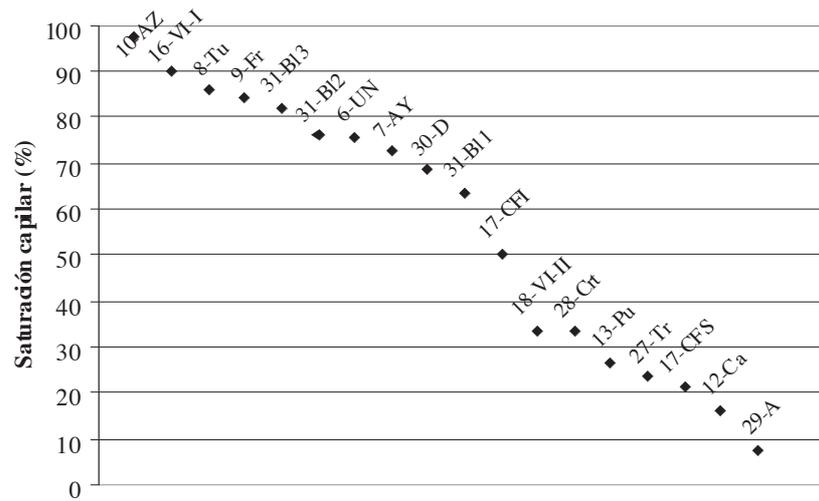


Figura VI-19: Rocas ordenadas en función del grado de saturación alcanzado en el punto de inflexión de la curva de absorción capilar.

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 ($p(h)$): $z(x_\alpha), z(x_\alpha+h), \alpha=1,2,\dots,p(h)$ usando:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2p(h)} \sum_{\alpha=1}^{p(h)} \{z(x_\alpha) - z(x_\alpha + h)\}^2$$

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.

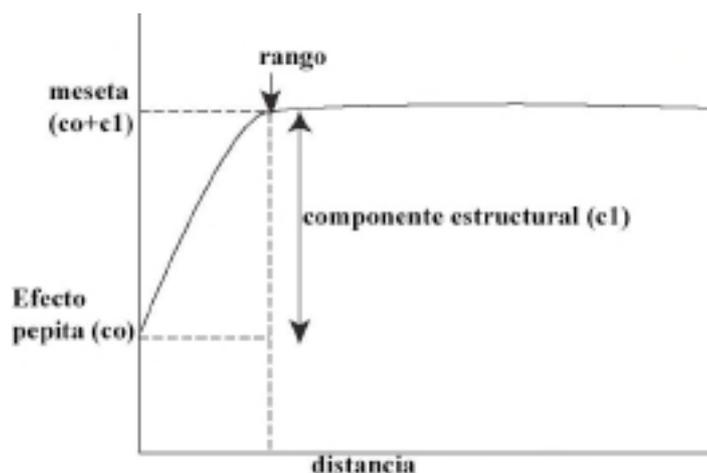


Figura VI-20: Modelo de variograma experimental (tomado de McKinley *et al.*, 2006).

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_1): Representa la variación de la correlación espacial.

Meseta (c_0+c_1): 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.

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.

VI.4.2.- 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.

Sigla: 31-B11

Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 100,68 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 101,68 mD.

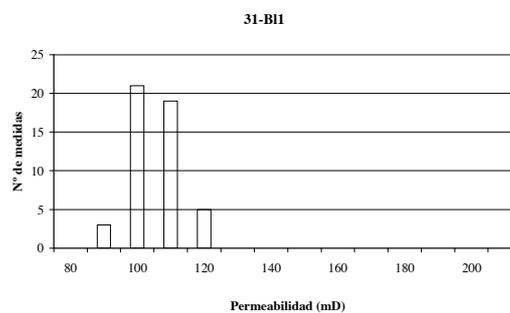
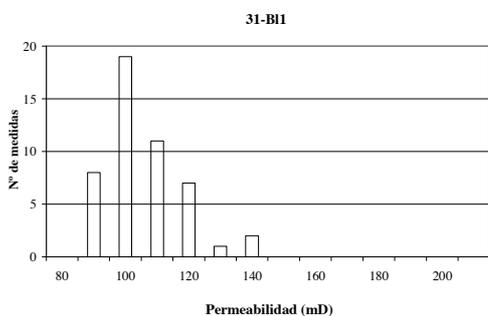
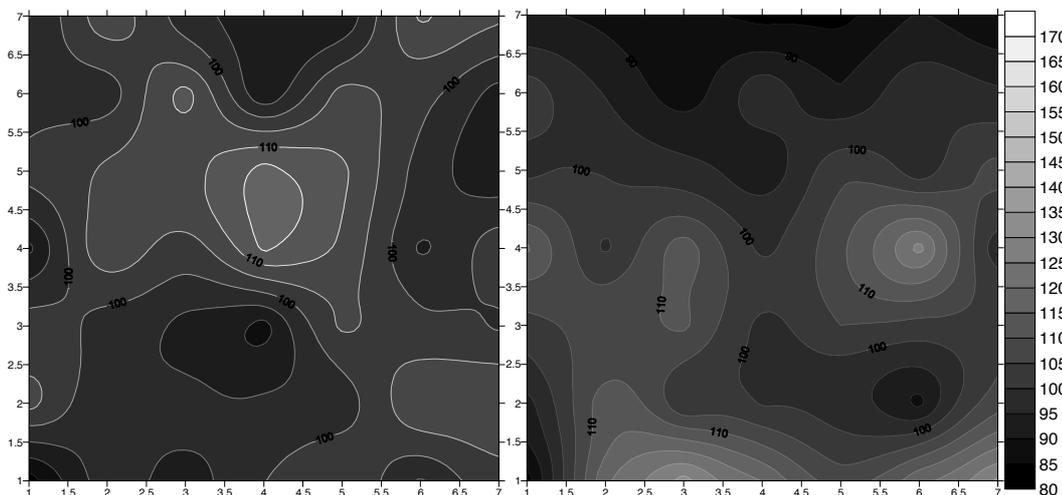
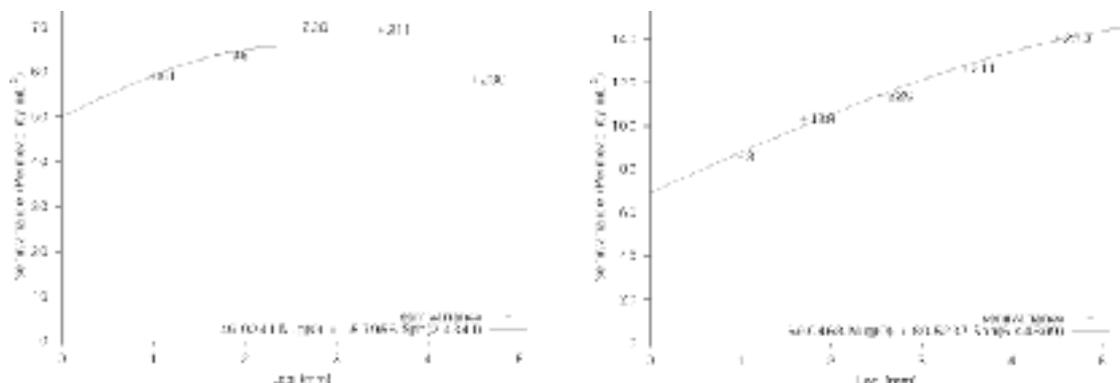


Figura VI-22: Ficha de la roca 31-B11 con los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas.

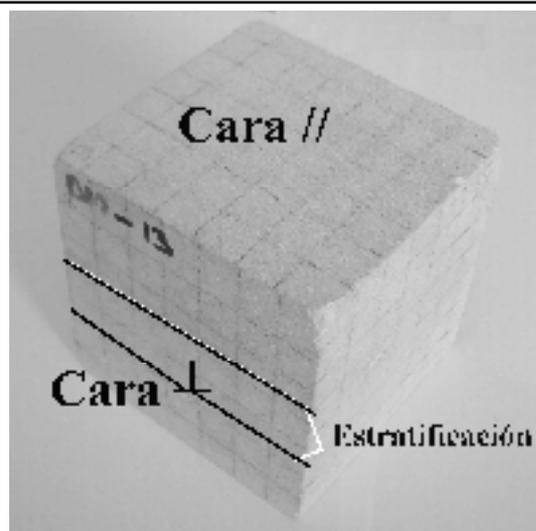


Figura VI-21: Orientación de las caras en las que se han realizado las medidas de permeabilidad.

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 \perp 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 Albortón.

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 Albortón (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 muestra 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 isótropo. 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	39,10

La roca 31-BI3 presenta una permeabilidad media de 135,88 mD en la cara ⊥ 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 esparita 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
⊥	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 ⊥ 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 ⊥ 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
⊥	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 ⊥ 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 ⊥. 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 VI-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-B12	2,95
28-Crt	2,87
30-D	1,49
9-Fr	1,47
31-B11	0,98
13-Pu	0,65
31-B13	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.

VI.4.3.- 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.

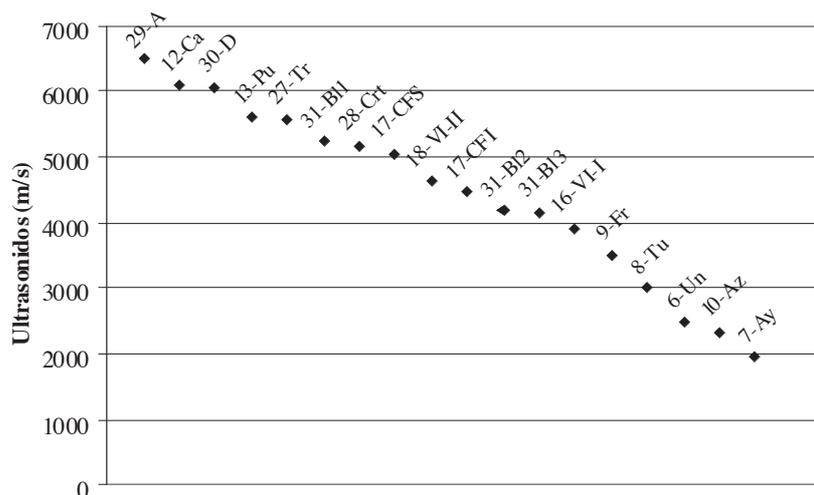


Figura VI-23: Rocas ordenadas en orden decreciente según su velocidad de propagación de ultrasonidos en roca seca y en la dirección perpendicular a la estratificación.

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:

Biomicroritas porosidad superior al 10%: 8-Tu, 9-Fr.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 17-CFI, 31-B13.

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:

Biomicroritas-Pelmicroritas porosidad inferior al 3%: 28-Crt, 29-A.

Rocas recristalizadas carbonatadas: 17-CFS, 27-Tr, 30-D, 31-B11, 31-B12.

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:

Biomicroritas-Pelmicroritas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu.

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

Tabla VI-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-B12	8,29	14,29
31-B13	9,17	5,13
31-B11	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 VI-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-B12	2,08	8,49
31-B13	3,01	7,15
31-B11	3,4	3,84
6-Un	5,68	0,90
7-Ay	2,23	2,13
10-Az	1,95	3,90

VI.5.- Conclusiones.

VI.5.1.- Correlación entre parámetros petrográficos y estructura porosa.

Mineralogía-tamaño de grano:

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. Beard y Weyl (1973) demostraron este fenómeno midiendo la permeabilidad en arenas con diferente tamaño de grano.

Los cuarzos y feldespatos presentes en las rocas areníticas con formas redondeadas-subangulosas de gran tamaño originan en su contorno poros de gran radio, mientras que los fragmentos líticos carbonatados presentan elevados porcentajes de microporosidad intrapartícula.

Los cristales de calcita de tamaño micrométrico que conforman la micrita inducen la formación de poros de pequeño tamaño en las calizas micríticas (figura VI-24). Los cristales de dolomicrita, la microesparita calcita y dolomítica y el cemento carbonatado (tanto calcítico como dolomítico) en las rocas carbonatadas recrystalizadas, inducen la formación de poros de pequeño tamaño aunque superiores a los originados por la micrita calcítica (figura VI-24). Variaciones en el grado de cementación en la roca originan cambios en las características del sistema poroso.

En la figura VI-24 se ha representado el tamaño medio de la microporosidad de cada roca frente a la relación entre la micrita calcítica y la suma de la dolomicrita, microesparita calcítica y dolomítica y esparita tanto calcítica como dolomítica. Las rocas con un bajo contenido en micrita calcítica poseen un tamaño medio de sus microporos superior a las rocas que poseen un mayor porcentaje de micrita calcítica en su composición. La roca Fr presenta un tamaño medio mayor del esperado según esta relación, como consecuencia de la porosidad asociada a la bioturbación por raíces.

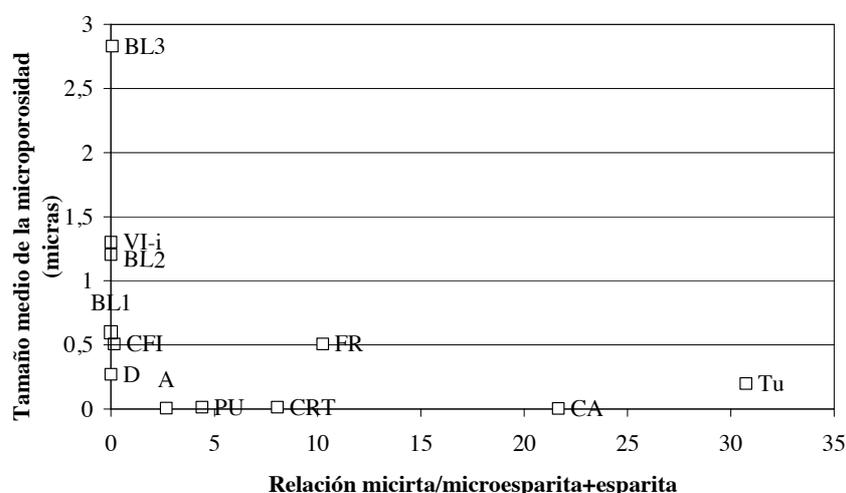


Figura VI-24: Relación entre el tamaño medio de la microporosidad frente a la proporción de micrita respecto de la suma de microesparita y esparita.

Discontinuidades:

La presencia de discontinuidades en las rocas origina un aumento en la porosidad efectiva del material. La caliza de Abanto (29-A) alcanza una macroporosidad relativa del 8% debida a estilolitos y vénulas parcialmente rellenas.

Selección:

Las rocas detríticas caracterizadas tienen una variación muy pequeña en la selección, por lo que puede indicarse que, para estas rocas, este parámetro carece de importancia a la hora de establecer diferencias en su estructura porosa.

Tamaño de poros y accesos de poro:

Estos parámetros gobiernan la intensidad del flujo de fluidos en el interior de los materiales pétreos, mientras que la porosidad abierta determina el volumen de roca por el que los fluidos pueden moverse. Cuanto mayores son los accesos de poro, mayor es el flujo en el interior de la roca.

El análisis digital de imágenes es una herramienta útil y versátil para cuantificar variaciones en las características texturales en lámina delgada. 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.

Tortuosidad del sistema poroso:

La tortuosidad del sistema poroso determina la velocidad media de transmisión del fluido en el interior del material. Cuanto menor es la tortuosidad del sistema poroso, mayor es la velocidad de transmisión de fluidos.

VI.5.2.- Correlación entre estructura porosa y propiedades físicas.

-La transmisión de fluidos en el interior de los materiales pétreos de las diferentes variedades caracterizadas se correlaciona 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 probetas en los estadios iniciales del ensayo de absorción, así como la absorción capilar, están controlados por el tamaño medio de los accesos de poro, siendo mayor la saturación conforme aumenta el tamaño medio de acceso de los poros.

Tamaño medio de acceso de poro y coeficiente de saturación a 1 hora:

Existe una buena correlación entre el tamaño medio de acceso de poro y el coeficiente de saturación a 1 hora, aumentando el coeficiente de saturación conforme aumenta el tamaño medio de acceso de poro. Esta correlación disminuye para los coeficientes de saturación a 24 y 48 horas.

Para las rocas carbonatadas, el coeficiente de correlación R es de 0,91 y la ecuación es:

$$y = 11,681\text{Ln}(x) + 64,916$$

Para el conjunto de todas las rocas, el coeficiente de correlación R es de 0,89 y la ecuación es:

$$y = 10,197\text{Ln}(x) + 61,391$$

Tamaño medio de acceso de poro y coeficiente de absorción capilar (C.A.C.):

Existe una buena correlación entre el tamaño medio de acceso de poro y el C.A.C., aumentando el C.A.C. conforme aumenta el tamaño medio de acceso de poro.

Para las rocas carbonatadas, el coeficiente de correlación R es de 0,73 y la ecuación es:

$$y = 8,2776x + 5,9383$$

Para el conjunto de todas las rocas, el coeficiente de correlación R es de 0,96 y la ecuación es:

$$y = 19,947x - 3,3176$$

-El secado de los materiales pétreos, a diferencia de la absorción, 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 presentan un elevado contenido de agua crítico, una mayor retención de agua tras secado (lo que indica un secado más lento y menos eficaz) y un menor grado de saturación durante la absorción capilar. Estos resultados están de acuerdo con la afirmación de Winkler 1997 que proponía que los poros capilares inferiores a 0,1 μm son poros muy difícilmente accesibles al agua.

Porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 μm y grado de saturación capilar (S_c):

Existe una correlación entre el porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 μm y el grado de saturación capilar, aumentado el grado de saturación capilar conforme disminuye el porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 μm .

Para las rocas carbonatadas, el coeficiente de correlación R es de 0,89 y la ecuación es:

$$y = -0,6647x + 79,215$$

Para el conjunto de todas las rocas, el coeficiente de correlación R es de 0,88 y la ecuación es:

$$y = -1,1057x + 98,755$$

Porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 µm y contenido en agua crítico:

A diferencia de la absorción, la rapidez en el secado de los materiales no muestra una buena correlación con el tamaño medio de acceso de poro. Sin embargo, si existe una buena correlación entre el contenido en agua crítico y el porcentaje de accesos de poros inferiores a 0,1 µm. El secado más lento corresponde a aquellas rocas que presentan un porcentaje mayor de accesos de poro inferiores a 0,1 µm.

Para las rocas carbonatadas, el coeficiente de correlación R es de 0,94 y la ecuación es:

$$y = 1,4571x - 27,202$$

Para el conjunto de todas las rocas, el coeficiente de correlación R es de 0,93 y la ecuación es:

$$y = 1,4103x - 24,344$$

Porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 µm y a 0,01 µm y contenido en agua tras desorción:

La retención de agua tras secado, en las rocas carbonatadas, no muestra una buena correlación con el tamaño medio de acceso de poro, pero si que la muestra con el porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 µm y a 0,01 µm. La retención de agua tras secado es mayor en aquellas rocas que presentan un porcentaje elevado de accesos de poro inferiores a 0,1 µm y 0,01 µm.

Según el porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,01 µm, el coeficiente de correlación R es de 0,81 y la ecuación es:

$$y = 2,6396x - 6,1383$$

Según el porcentaje de accesos de poro inferiores a 0,1 µm, el coeficiente de correlación R es de 0,78 y la ecuación es:

$$y = 4,3912x + 4,5414$$

-Coeficientes tales como el coeficiente de saturación a 1 hora y el contenido de agua crítico aportan información sobre la conectividad del sistema poroso. Las rocas con una alta conectividad de su sistema poroso presentan elevados valores para el coeficiente de saturación a 1 hora y valores reducidos para el contenido de agua crítico.

Coeficiente de saturación a 1 hora y contenido en agua crítico:

Existe una buena correlación entre el contenido en agua crítico y el coeficiente de saturación a 1 hora, aumentando el coeficiente de saturación a 1 hora conforme disminuye el contenido en agua crítico.

Para las rocas carbonatadas, el coeficiente de correlación R es de 0,91 y la ecuación es:

$$y = -0,8681x + 86,505$$

Para el conjunto de todas las rocas, el coeficiente de correlación R es de 0,9 y la ecuación es:

$$y = -0,8612x + 86,407$$

-El sistema automatizado permite caracterizar el comportamiento hídrico de los materiales pétreos con más precisión que mediante el procedimiento clásico. Este sistema permite un registro continuo de la entrada de agua en la roca (hasta cinco valores por segundo) y elimina los posibles errores debidos a la manipulación de la probeta durante el ensayo.

-No existe una relación directa entre permeabilidad y porosidad abierta. Los estudios geoestadísticos, junto con el estudio petrográfico, permiten discernir las zonas de alta y baja permeabilidad en los materiales pétreos, así como identificar los elementos texturales que controlan su distribución espacial. Esta variación espacial de la permeabilidad es el resultado de las características deposicionales y de los diferentes procesos diagenéticos que han tenido lugar en las rocas. Entre los elementos texturales y procesos diagenéticos identificados como elementos perturbadores de la permeabilidad se encuentran: bioturbaciones, recristalizaciones selectivas de la calcita, juntas estilolíticas, procesos de cementación secundaria y presencia de microgeodas parcialmente tapizadas por cristales de calcita.

-Las zonas de alta permeabilidad serán puntos con una mayor alterabilidad potencial por tratarse de lugares favorables para la entrada y/o circulación de fluidos.

-En los casos en los que no ha sido posible ajustar el variograma a las medidas de permeabilidad, no quiere decir que no exista un control estructural en la variabilidad de esta propiedad en el material, sino que el control de la variación de la permeabilidad tiene lugar a una escala menor de la que estamos trabajando.

-Existe una buena correlación entre ultrasonidos y porosidad total, aumentando la velocidad de propagación de ultrasonidos conforme disminuye la porosidad. Las mayores velocidades de propagación de ultrasonidos corresponden a las biomicritas con porosidad inferior al 3%, seguidas de las rocas carbonatadas recristalizadas, biomicritas con porosidad superior al 10% y arenitas con porosidad superior al 5%.

El coeficiente de correlación entre velocidad de propagación de ultrasonidos y porosidad en roca seca para rocas carbonatadas es de $R=0,92$ y la ecuación es:

$$y = -236,14x + 9481,5$$

El coeficiente de correlación entre velocidad de propagación de ultrasonidos y porosidad en roca seca para todas las rocas es de $R=0,85$ y la ecuación es:

$$y = -300,62x + 9644,3$$

-Tras la saturación de las probetas tiene lugar un aumento tanto en la velocidad de propagación de ultrasonidos como en la anisotropía respecto de la roca seca. Sin embargo, estos aumentos no están correlacionados con la porosidad del material.

VI.5.3.- Conclusiones según la clasificación textural de la roca.

VI.5.3.1.- Arenitas porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

Petrográficamente, estas rocas se clasifican como litoarenitas de grano medio. El tamaño de grano, forma de los clastos y selección de las arenitas estudiadas son muy homogéneos. Petrográficamente la arenita de Uncastillo (6-Un) se caracteriza por una elevada relación calcita/cuarzo (4,3) y un alto porcentaje de líticos metamórficos, lutíticos y volcánicos (21,6%). La arenita de Ayerbe (7-Ay) se caracteriza por una baja relación calcita/cuarzo (1,24) y un porcentaje alto de líticos metamórficos, lutíticos y volcánicos (22%), mientras que la arenita de Alcañiz (10-Az) se caracteriza por un elevado contenido en dolomita (10%), turmalina (2-3%) y por la escasez de líticos metamórficos, lutíticos y volcánicos (2%).

Estas rocas presentan una porosidad abierta media y unos valores de porosidad total similares, comprendido entre el 9,73% de 10-Az y el 12,63% de 7-Ay. La porosidad inaccesible, respecto de la porosidad total, está comprendida entre el 23% de 6-Un y el 27% de 10-Az.

Las gráficas de absorción continua para estas rocas muestran una diferenciación en tres rectas de diferente pendiente, con un cambio neto de pendiente entre la fase inicial y la fase intermedia.

Las tres rocas tienen una saturación rápida y elevados valores tanto del coeficiente de absorción capilar, especialmente en 10-Az, como del grado de saturación capilar. Las arenitas 6-Un y 7-Ay presentan valores similares entre sí y superiores a los de 10-Az de retención de agua tras secado y contenido en agua crítico.

En las arenitas 6-Un y 7-Ay se han medido unos porcentajes de macroporosidad y un tamaño medio de acceso de poros similar entre sí e inferiores a los de la arenita 10-Az. Las tres rocas se clasifican dentro del grupo III establecido por porosimetría de inyección de mercurio (mas del 45% de su volumen de accesos de poro son mayores de 1 μm).

Los resultados de los ensayos hídricos (tabla VI-19) para 10-Az indican 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 definen una conectividad menor en su sistema poroso que en la roca 10-Az, con una desorción más lenta y menos eficaz. Estos resultados permiten establecer una mayor alterabilidad potencial en 6-Un y 7-Ay.

Tabla VI-19: W- contenido en humedad (%); P₀- porosidad abierta (%); P- porosidad total (%); S₁- coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d- retención de agua tras secado (%); W_{cri}- contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($\text{gm}^2\text{s}^{-0,5}$), S_c- saturación capilar (%).

	W	P ₀	P	S ₁	W _d	W _{cri}	C.A.C.	S _c	Tamaño medio (μm)
6-UN	4,61	10,43	13,69	67,78	13,5	30,34	118,63	75,8	3,99
7-AY	5,73	12,63	16,67	72,24	23,6	34,67	91,511	72,7	4,49
10-AZ	4,29	9,73	13,36	71,8	7,4	16,08	241,41	97,5	12,07

VI.5.3.2.- Biomicritas-pelmicritas porosidad inferior al 3%: 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt, 29-A.

Petrográficamente, estas rocas se describen como Biomicritas-Pelmicritas según la clasificación de Folk (1962) de textura granuda no granosoportada y de tamaño de grano fino. Estas rocas presentan una porosidad abierta baja, que condiciona su bajo contenido en agua y su baja absorción capilar. Los valores de porosidad inaccesible son inferiores al 10% de la porosidad total.

Las gráficas de absorción continua para estas rocas se descomponen en dos rectas con un cambio de pendiente gradual entre la fase inicial y la fase final.

Estas rocas tienen una velocidad de absorción lenta, una desorción lenta y poco efectiva y una absorción capilar reducida, mostrando los valores más bajos de todas las rocas caracterizadas para el grado de saturación a 1 hora y los valores más elevados de contenido en agua crítico. También alcanzan elevados valores de retención de agua tras secado.

Los resultados de los ensayos hídricos para estas rocas (tabla VI-20) indican un sistema poroso tortuoso, heterogéneo, compuesto por accesos de poro de pequeño tamaño y con una baja conectividad.

Las rocas pertenecientes a este grupo presentan el tamaño medio de acceso de poro inferior de todas las rocas caracterizadas. Este tamaño medio de acceso de poro 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%. Más del 86% de sus radios de acceso de poro son inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ y estas rocas han sido clasificadas dentro del grupo I mediante porosimetría de inyección de mercurio.

Tabla VI-20: W- contenido en humedad (%); P_0 - porosidad abierta (%); P- porosidad total (%); S_1 - coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d - retención de agua tras secado (%); W_{cri} - contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($\text{gm}^2\text{s}^{-0,5}$), S_c - saturación capilar (%).

	W	P_0	P	S_1	W_d	W_{cri}	C.A.C.	S_c	Tamaño medio (μm)
12-Ca	0,31	0,82	0,83	8	21,9	81,29	0,88	16,2	(0,0038) 0,0038
13-Pu	1,01	2,66	2,95	17,13	11,9	73,67	1,05	26,6	(0,0123) 0,0123
28-Crt	1,21	3,12	3,4	34,04	5,87	59,3	2,27	33,4	(0,015) 0,23
29-A	0,24	0,65	0,66	23,44	17,2	83,25	1,31	7,54	(0,0057) 0,18

VI.5.3.3.- Biomicritas porosidad superior al 10%: 8-Tu y 9-Fr.

Petrográficamente, estas rocas se describen como Biomicritas según la clasificación de Folk (1962) su textura es granuda, soportada por la matriz calcítica y son impuras (aparecen en su composición porcentajes variables de cuarzo y filosilicatos). Presentan una porosidad abierta elevada y unos valores de porosidad total de 17,08% para 9-Fr y de 23,28% para 8-Tu. La porosidad inaccesible, respecto de la porosidad total, es en ambas rocas inferior al 10%.

Las gráficas de absorción continua elaboradas para estas rocas no poseen la fase intermedia y presentan un cambio neto de pendientes entre la fase inicial y la fase final. Tienen una saturación rápida, elevados valores tanto del coeficiente de absorción capilar como del grado de saturación capilar, y valores bajos de retención de agua tras secado y de contenido en agua crítico.

Los resultados de los ensayos hídricos para estas rocas (tabla VI-21) indican que la cinética de los procesos de absorción y desorción de agua se producen con celeridad, a través de un sistema poroso homogéneo, bien comunicado y con accesos de gran tamaño. Esta celeridad en la desorción de agua asegura 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 características les confieren un buen comportamiento frente a los posibles mecanismos de deterioro favorecidos por la circulación de fluidos.

Estas rocas se han clasificado como pertenecientes al grupo II por porosimetría de inyección de mercurio (más del 65% de su volumen de accesos de poro pertenece al rango 0,1-1 μm). Presentan unos valores similares de tamaño medio de acceso de poro y de porcentaje de macroporosidad, aunque la distribución de tamaños de acceso de poro es sensiblemente diferente entre ambas rocas. La roca 8-Tu se caracteriza por presentar el 98% de sus accesos de poro dentro del rango 0,1-1 μm , mientras que la roca 9-Fr presenta únicamente el 80% de sus accesos de poro en este rango.

Tabla VI-21: W- contenido en humedad (%); P₀- porosidad abierta (%); P- porosidad total (%); S₁- coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d- retención de agua tras secado (%); W_{cri}- contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($\text{gm}^2\text{s}^{-0,5}$), S_c- saturación capilar (%).

	W	P ₀	P	S ₁	W _d	W _{cri}	C.A.C.	S _c	Tamaño medio (μm)
8-Tu	11,23	22,02	23,28	90,32	1,06	17,35	96,18	85,9	(0,200)1,66
9-Fr	6,99	15,2	17,08	77,13	1,24	23,81	37,08	84,4	(0,506)0,660

VI.5.3.4.- Rocas recrystalizadas carbonatadas (porosidad 3-10%): 16-VI-I, 17-CFI, 17-CFS, 18-VI-II, 27- Tr, 30-D, 31-B11, 31-B12 y 31-B13.

Petrográficamente, estas rocas se describen como carbonatos cristalinos clasificados como Sparstone (Wright 1992) que pueden ser de composición calcítica o dolomítica. Estas rocas tienen una porosidad abierta baja (16-VI-I, 17-CFS, 18-VI-II, 27-Tr y 30-D) que condiciona su bajo contenido en agua y capilaridad y media (17-CFI, 31-B11, 31-B12 y 31-B13). Muestran valores de porosidad inaccesible elevados, siendo estos valores especialmente elevados en el caso de las rocas recrystalizadas de composición calcítica.

Las gráficas de absorción continua elaboradas para 27-Tr y 30-D se descomponen en dos rectas con un cambio de pendiente gradual entre la fase inicial y la final. La velocidad de absorción en estas rocas es inferior a la del resto de rocas carbonatadas recrystalizadas, pero superior al de las biomicritas con porosidad inferior al 3%. Presentan valores reducidos para el coeficiente de absorción capilar.

Las gráficas de absorción elaboradas para el resto de las rocas carbonatadas recristalizadas se descomponen en dos rectas con un cambio de pendiente neto entre la fase inicial y la final.

Las rocas carbonatadas recristalizadas presentan una saturación rápida, salvo 18-VI-II, 27-Tr, 30-D y 31-B11 y unos valores bajos de retención de agua tras secado y de contenido en agua crítico. Los valores de absorción capilar en estas rocas son variables, así como del grado de saturación capilar, pero están comprendidos entre los valores de las biomicitas con porosidad superior al 10% y los valores de las biomicitas con porosidad inferior al 3%. El grado de saturación capilar es especialmente elevado en 16-VI-I, 31-B12 y 31-B13 con valores superiores al 80% y especialmente reducido para 18-VI-II (33%) y 17-CFS (21%).

Los resultados obtenidos para las rocas que componen este grupo (tabla VI-22) indican 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%, excepto en 30-D, lo que indica una velocidad de secado media-alta. Estas características les confieren un buen comportamiento frente a los posibles mecanismos de deterioro favorecidos por la circulación de fluidos.

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 inyección de mercurio. Presentan unos valores de macroporosidad y de tamaño medio de acceso de poro variables en función del grado de recristalización y de los procesos diagenéticos sufridos.

Tabla VI-22: W- contenido en humedad (%); P₀- porosidad abierta (%); P- porosidad total (%); S₁- coeficiente de saturación a 1 hora (%); W_d- retención de agua tras secado (%); W_{cri}- contenido de agua crítico (%); C.A.C.- coeficiente de absorción capilar ($\text{gm}^2\text{s}^{-0,5}$), S_c- saturación capilar (%).

	W	P ₀	P	S ₁	W _d	W _{cri}	C.A.C.	S _c	Tamaño medio (μm)
16-VI-I	1,87	4,51	9,63	80,2	0,24	29,38	16,43	90,1	(1,300) 3,49
17-CFI	3,62	8,54	10,3	69,8	0,32	16,93	27,97	50,2	(0,507) 0,97
17-CFS	1,3	3,26	4,91	75,74	1,41	19,56	6,05	21,2	
18-VI-II	1,95	4,6	10,59	59,4	1,96	19,05	36,66	33,5	
27-Tr	1,66	4,09	7,35	52,46	0,74	24,64	8,47	23,5	
30-D	1,32	3,43	3,74	53,93	2,71	38,52	10,4	68,6	(0,27) 0,27
31-B11	3,78	9,19	11,33	54,41	5,06	24,68	13,21	63,7	(0,599) 1,27
31-B12	3,83	9,3	10,64	76,08	8,58	26,86	27,85	76,1	(1,205) 1,60
31-B13	2,76	6,8	10,73	75,52	2,65	23,52	35,69	82,1	(2,830) 3,05

CAPÍTULO VII.- EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

CAPÍTULO VII.- EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES.

VII.1.- Introducción.

La caracterización de estos materiales se ha completado con la evaluación de su durabilidad frente a los procesos de cristalización de sales. Se ha seleccionado este ensayo, en lugar de otros ensayos clásicos de envejecimiento artificial acelerado, por ser el proceso de deterioro que afecta de una forma más agresiva a los materiales de usos constructivos en nuestro entorno, así como por la amplia experiencia de nuestro equipo de investigación en este campo.

La durabilidad de los materiales pétreos es un término complejo y que sólo puede ser definida y entendida en relación con el contexto. 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). La velocidad de alteración depende de las características intrínsecas del material (Torraca, 1986). En esta definición hay que tener en cuenta, además de las características propias del material, las características ambientales a las que se verá sometido el material en su nueva ubicación y la relación de esta ubicación con el resto de la construcción.

Establecer la durabilidad de los materiales pétreos presenta una gran complejidad dado que requiere relacionar un gran número de factores y, no es fácil de predecir por la cantidad de variables que pueden entrar en juego (Cultrone *et al.*, 2007; Price, 1996). La diferente naturaleza de los diferentes procesos de alteración hace que sean sistemas altamente complejos. Por ello, es difícil establecer la durabilidad de un material mediante un único ensayo.

La durabilidad de los materiales pétreos de usos constructivos viene determinada por dos tipos de factores:

- Factores intrínsecos: Este grupo de factores hace referencia a las características químico-mineralógicas, texturales (distribución, geometría y conectividad del sistema poroso, tamaño cristalino, tipos de contacto, etc.) y estructurales del material.
- Factores extrínsecos: Este grupo hace referencia al conjunto de factores relacionados con las condiciones ambientales tras la colocación del material, así como a la relación de este con el resto del conjunto.

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 por sales (Mc Greevy, 1996; Ordoñez *et al.*, 1997; Sebastián Pardo and Zezza, 1995). Distintos autores han tratado de establecer clasificaciones de la durabilidad en función de las características del sistema poroso. Kaneuji (1978) y Kaneuji *et al.*, (1980) desarrollaron una clasificación basada en dos parámetros: porosidad total y tamaño medio de diámetro de poro; Punuru *et al.*, (1990) propusieron

otra clasificación en función de la distribución de tamaños de poro calculados mediante porosimetría de inyección de mercurio estableciendo tres grupos: V1 (volumen de poros $> 5 \mu\text{m}$ de radio), V2 ($0.5 \mu\text{m} > \text{radio} > 5 \mu\text{m}$) y V3 ($\text{radio} < 0.5 \mu\text{m}$). Mediante ensayos de laboratorio demostraron que aquellos materiales con menor durabilidad eran los que tenían mayores proporciones de poros inferiores a $0,5 \mu\text{m}$. Sebastián Pardo & Zezza, (1995) establecen este límite en $2,5 \mu\text{m}$. Fitner and Snethlage (1982) indicaron que muestras de rocas con una gran proporción de pequeños capilares y microporosidad (una distribución de poro bimodal) son extremadamente susceptibles al ataque por cristalización de sales.

Además del sistema poroso, la resistencia a tracción del material también juega un papel importante en la durabilidad frente a la cristalización de sales, siendo menos durables los materiales con menor resistencia (Ruedrich *et al.*, 2005).

Los ensayos de alteración acelerada son pruebas útiles para evaluar la durabilidad de los materiales pétreos. En estos ensayos, se trata de reproducir en laboratorio los procesos naturales de una forma acelerada (Dearman, 1982; Martin *et al.*, 1992; Rivas *et al.*, 1998). El deterioro de los materiales pétreos de usos constructivos influye en el comportamiento del material, en su adecuación de uso, así como en las estrategias para su conservación.

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 and Dohene, 1999; Scherer, 1999; Flat, 2002).

La consecuencia de este proceso es el daño estructural y la pérdida de material. Por ello, es fundamental para evaluar la durabilidad de los materiales pétreos tras su puesta en obra, conocer tanto las modificaciones que generan en el sistema poroso las sales tras su cristalización, así como su distribución en el interior del material.

Las modificaciones que se generan en el sistema poroso provocan que el incremento en la velocidad de alteración de un material de construcción no sea lineal, sino que en la mayoría de los casos sea exponencial tal y como fue señalado por Winkler (1975). Parámetros de la roca como son la porosidad (McGreevy, 1996; Nicholson, 2001; Bidner *et al.*, 2002; Prikryl and Dudková, 2002; Jornet *et al.*, 2002; Pera and Burlini, 2002) y la permeabilidad (Carey and Curran, 2000; Russell *et al.*, 2002; Warke *et al.*, 2006; McKinley *et al.*, 2006; McKinley and Warke, 2007) son propiedades petrofísicas claves para controlar la alteración durante los ensayos de laboratorio.

En este capítulo, se pone un especial énfasis en la variación que tiene lugar tras la cristalización de sales en propiedades físicas de los materiales tales como la absorción, succión capilar y permeabilidad. Las modificaciones en estas propiedades físicas permiten identificar el grado o nivel de degradación alcanzado y, por lo tanto, obtener información muy importante sobre la durabilidad de los materiales e inferir las pautas de alteración en rocas porosas.

Las modificaciones que tienen lugar en el sistema poroso durante los procesos de alteración son cambios en la conectividad, sellado parcial de la porosidad, creación

de nuevos poros y fisuras o ensanchamiento de los preexistentes. Estos nuevos espacios vacíos pueden crecer independientemente o bien estar asociados a otras microgrietas o poros.

Los resultados de estos ensayos individuales reflejan únicamente la susceptibilidad de una roca ante un único agente bajo condiciones estandarizadas. Por ello, es necesario interpretar en conjunto el significado de estos ensayos y encontrar relaciones con la realidad.

Las sales seleccionadas para estudiar la durabilidad, de estos materiales de construcción han sido la indicada por la norma UNE-EN 12370:1999, sulfato sódico decahidratado al 14% $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, así como aquellas que comúnmente afectan a la obra civil moderna y a las obras histórico-artísticas en la zona noroeste de España: el cloruro sódico (NaCl) y el sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Estas tres especies salinas pertenecen al grupo de las cinco sales más agresivas señaladas por Goudie en 1993. Goudie estableció el siguiente ranking de agresividad de sales ordenadas de mayor a menor agresividad: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - NaCl - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Las propiedades físicas de la disolución, las características ambientales y las características del sistema poroso de la roca controlan el flujo y las zonas preferentes donde tienen lugar la cristalización de sales. En la tabla VII-1 se exponen las principales características físicas y químicas de las soluciones salinas utilizadas.

Tabla VII-1: Propiedades físicas y químicas de las soluciones salinas utilizadas a 20 °C. Datos obtenidos del CRC Handbook of Chemistry and Physics (2005).

Solución saturada	Concentración g anhidro/100 ml solución	Densidad (g/cm^3)	Tensión superficial (mN/m)	Viscosidad (cP)	Presión de vapor (kPa)
Na_2SO_4	19,4	1,15	75,45	1,834	2,175
MgSO_4	33,5	1,29	77,35	7,270	2,781
NaCl	26,4	1,19	81,34	1,986	1,763

Sulfato de sodio

El sistema Na_2SO_4 - H_2O incluye 2 fases estables: la fase anhidra, thenardita (Na_2SO_4) que precipita directamente a partir de la solución a temperaturas superiores a 32,4 °C y la fase hidratada, mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) estable por debajo de los 32,4 °C. La transformación del sulfato sódico anhidro (thenardita) en sulfato de sodio decahidratado (mirabilita) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ supone un incremento de volumen del 300%.

En la figura VII-1 se observan los rangos de estabilidad para el sulfato de sodio en función de la temperatura y de la humedad relativa.

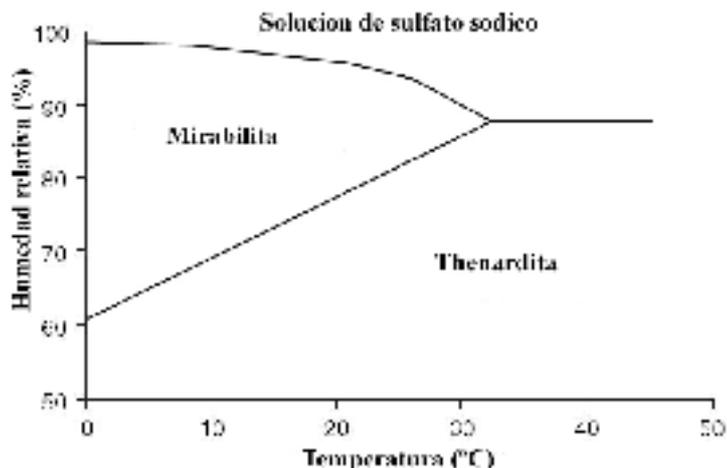


Figura VII-1: Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa de la mirabilita y thenardita (tomada de Steiger and Dannecker, 1988).

Sulfato de magnesio

El sistema $MgSO_4 \cdot nH_2O$ incluye 3 fases estables en los rangos de presión y temperaturas de la superficie terrestre (Vaniman *et al.*, 2004): epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), hexaedrita ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$) y kieserita ($MgSO_4 \cdot H_2O$). En sistema acuoso, la epsomita es estable a temperaturas por debajo de los 48,4 °C, la hexaedrita es estable en rangos de temperatura de 48,4-68 °C y la kieserita es estable para temperaturas superiores a 68 °C (Robson, 1927). La transformación de kieserita ($MgSO_4 \cdot H_2O$) en epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) supone un aumento de volumen del 173%.

En la figura VII-2 se observan los rangos de estabilidad para el sulfato de magnesio en función de la temperatura y de la humedad relativa.

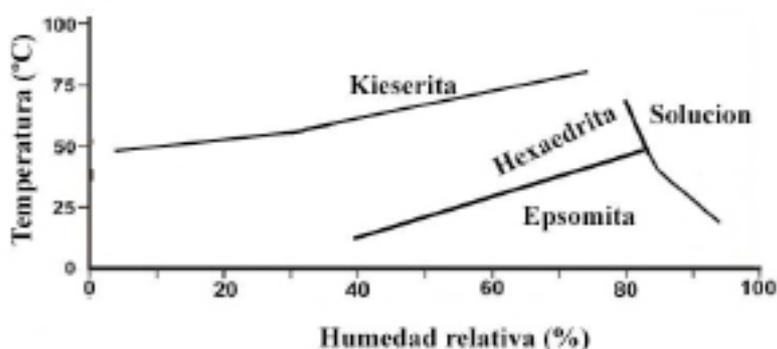


Figura VII-2: Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa del sistema $MgSO_4 \cdot H_2O$ (tomada de Steve *et al.*, 2006).

Cloruro de sodio

El sistema NaCl-H₂O tiene una única fase estable: la fase anhidra, halita (NaCl). El cloruro sódico cristaliza en la fase anhidra halita para temperaturas superiores a 0 °C y humedades relativas inferiores al 75%. En esta sal el principal factor de alteración es la presión de cristalización. En la figura VII-3 se observan los rangos de estabilidad para el cloruro de sodio en función de la temperatura y de la humedad relativa.

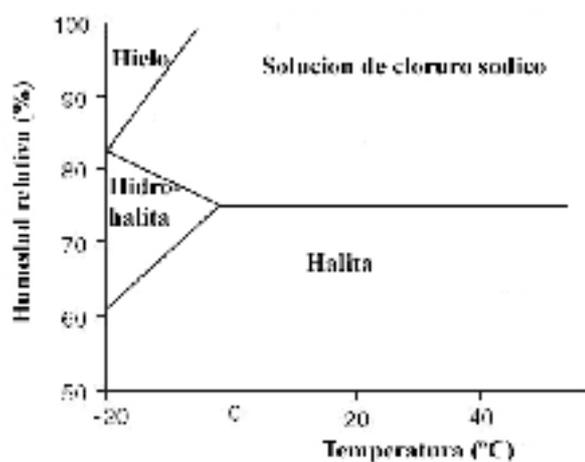


Figura VII-3: Diagrama de estabilidad temperatura-humedad relativa para el cloruro de sodio (tomada de Ruedrich *et al.*, 2007).

VII.2.- Ensayos de cristalización de sales.

VII.2.1.- Ensayo de cristalización de sales normalizado.

El ensayo normalizado de cristalización de sales se ha realizado bajo condiciones de laboratorio de acuerdo con el procedimiento de la norma “UNE-EN 12370. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales”. Esta norma indica que el ensayo es únicamente recomendable para materiales pétreos con una porosidad superior al 5%. Sin embargo, este ensayo también se ha realizado en las rocas con porosidad inferior al 5%, ya que estos materiales también pueden verse afectados por el fenómeno de la cristalización de sales y, por lo tanto, es de gran interés su caracterización.

Este ensayo de envejecimiento artificial acelerado es de gran utilidad para evaluar la resistencia a la alteración de los materiales pétreos de usos constructivos. Durante la realización del mismo, se generan tensiones cíclicas por cristalización y/o hidratación de sales que pueden desencadenar presiones elevadas en el interior de los poros y fisuras, que pueden llegar a exceder el límite elástico del material, causando su rotura y originando cambios en sus propiedades físicas y mecánicas.

El número de ciclos realizados ha sido de 15 en el caso de las rocas detríticas y de 30 en el caso de las rocas carbonatadas, debido a su mayor resistencia frente al deterioro por cristalización de sales.

La valoración de los cambios originados en el material pétreo tras los procesos de cristalización de sales se ha realizado mediante el estudio de la variación en peso a lo largo del ensayo, variación morfológica y modificación de las propiedades hídricas.

VII.2.1.1.- Variaciones en peso y morfológicas.

La valoración de los resultados de este ensayo se ha realizado conjuntamente a partir de las variaciones en peso y de las variaciones morfológicas de las probetas.

La pérdida en peso de las muestras se ha expresado en porcentaje respecto al peso seco inicial (tabla VIII-2). El resultado es el valor medio de la pérdida en peso para tandas de tres probetas y se ha calculado mediante la fórmula:

$$\text{Variación en peso} = (m_{d2} - m_d / m_d) \times 100$$

donde m_d es la masa inicial de la probeta seca (gr) y m_{d2} es la masa final de la probeta seca tras extraer las sales depositadas durante el ensayo de cristalización de sales, en gramos (gr).

La extracción de las sales depositadas durante el ensayo se ha realizado mediante sucesivos lavados con agua desionizada durante una semana. El lavado con agua desionizada se ha realizado tras el ciclo 15 en las rocas detríticas y tras los ciclos 15 y 30 en las rocas carbonatadas.

Tabla VII-2: Variación en peso de las rocas tras la realización del ensayo de cristalización de sales, expresado en porcentaje respecto al peso inicial de las probetas.

Sigla	Variación en peso %	Sigla	Variación en peso %	Sigla	Variación en peso %
12-Ca	-0,001	30-D	-0,13	17-CFI	-0,4
13-Pu	-0,002	31-B13	-0,18	8-Tu	-0,5
28-Crt	-0,05	9-Fr	-0,31	31-B12	-9,41
17-CFS	-0,09	31-B11	-0,31	10-AZ	-7,70
27-Tr	-0,09	29-A	-0,36	6-UN	-39,87
16-VI-I	-0,1	18-VI-II	-0,38	7-AY	-43,85

Las 18 rocas caracterizadas pueden ser agrupadas en dos grupos según su comportamiento durante el ensayo de cristalización de sales. Para cada uno de los dos grupos diferenciados se ha incluido, a modo de ejemplo, una gráfica de variación en peso (figura VII-11), mientras que las gráficas de todas las rocas caracterizadas se exponen en el anexo 4. En abscisas se ha representado el número de ciclos de cristalización de sales y en ordenadas la variación en peso respecto al peso inicial de la probeta seca. En los primeros ciclos del ensayo se observa una ganancia en peso generalizada (que en algunos tipos de rocas llega incluso hasta el último ciclo del ensayo) como consecuencia de la cristalización de sales en el interior del sistema poroso. Con el paso de los ciclos y debido a la pérdida de material por la acción de las sales, se produce un aumento progresivo en la pérdida en peso. En algunos materiales se observan cambios bruscos en las gráficas como consecuencia de la fractura y pérdida de fragmentos de las probetas.

Grupo A:

Rocas que presentan una pérdida en peso importante durante el ensayo de cristalización de sales. A este grupo pertenecen las arenitas con porosidad superior al 5%: 6-Un, 7-Ay, 10-Az y la roca carbonatada recristalizada 31-B12.

De las tres arenitas caracterizadas, la arenita de Alcañiz (10-Az) es la que ha presentado un mejor comportamiento frente al ensayo de cristalización de sales, presentando una pérdida en peso media del 7,7%. El examen visual de las probetas de 10-Az a la conclusión del ensayo de cristalización de sales (figura VII-4) pone de manifiesto que únicamente han sufrido una descohesión granular con pérdida superficial de material en los vértices, aristas y caras. La roca 10-Az ha comenzado a perder peso de una forma muy progresiva tras el ciclo noveno.

**Figura VII-4:** Aspecto de una de las probetas de la roca 10-Az en los ciclo 0 (foto izquierda) y 15 (foto derecha) de cristalización de sales.

Por su parte, tanto la arenita de Uncastillo (6-Un) como la arenita de Ayerbe (7-Ay) han sufrido una pérdida en peso media del 39,8% y 43,8%, respectivamente. Estos materiales han sufrido una pérdida general de material afectando tanto a los vértices, aristas y caras, pero en ningún caso se ha producido la rotura de la probeta. La pérdida de material ha sido de modo concéntrico, originando un redondeamiento paulatino de las probetas por un proceso de arenización homogénea (figuras VII-5, VII-6). Las rocas 6-Un y 7-Ay han comenzado a perder peso tras el ciclo quinto, siendo esta pérdida en peso más acusada tras el ciclo octavo.



Figura VII-5: Aspecto de una de las probetas de la roca 7-Ay en los ciclo 0 (foto izquierda) y 15 (foto derecha) de cristalización de sales.



Figura VII-6: Aspecto de una de las probetas de la roca 6-Un en los ciclo 0 (foto izquierda) y 15 (foto derecha) de cristalización de sales.

La roca 31-B12 presenta una pérdida en peso importante (9,41%). En esta roca, ha tenido lugar una fuerte arenización con pérdida de material en forma de granos de tamaño arena, así como la fragmentación de la probeta a favor de las superficies de contacto entre las zonas bioturbadas y las no bioturbadas (figura VII-7). Este material ha comenzado a perder peso tras el ciclo noveno de una forma progresiva, intensificándose a partir del ciclo vigésimo octavo (figura VII-11).



Figura VII-7: Aspecto de una de las probetas de la roca 31-B12 en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

Grupo B:

Rocas que presentan una pérdida en peso inferior al 0,5%. A este grupo pertenecen el resto de las rocas carbonatadas caracterizadas. Dentro de las rocas de este grupo, las rocas 8-Tu, 9-Fr, 30-D, 31-B11 y 31-B13 presentan, antes del lavado con agua desionizada, aumentos de peso mayores al 1% por acumulaciones de sales en su interior.

El examen visual de las rocas carbonatadas indica que siete de ellas (12-Ca, 16-VI-I, 18-VI-II, 17-CFS, 27-Tr, 28-Crt y 30-D) no presentan de visu ningún tipo de alteración. A modo de ejemplo en la figura VII-8 se muestra la roca 17-CFS.



Figura VII-8: Aspecto de una de las probetas de la roca 17-CFS en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

En las rocas 29-A, 13-Pu y 17-CFI no se observan procesos de pérdida de material durante el ensayo de cristalización de sales, pero muestran una incipiente alteración por ruptura sin desplazamiento relativo en la probeta (figura VII-11). En la roca 29-A esta alteración se genera a favor de los estilolitos que presenta el material, mientras que en el caso de 13-Pu tiene lugar en el contacto entre las galerías de bioturbación y las zonas no bioturbadas. En la roca 17-CFI esta fracturación incipiente no se produce a favor de ningún elemento textural. A modo de ejemplo en la figura VII-9 se muestra la roca 29-A.



Figura VII-9: Aspecto de una de las probetas de la roca 29-A en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

Las rocas 8-Tu, 9-Fr, 31-B11 y 31-B13 presentan una leve pérdida de cohesión intergranular que se manifiesta por la pérdida de material principalmente en bordes y aristas, generando un redondeamiento de las formas. A modo de ejemplo en la figura VII-10 se muestra la roca 9-Fr. Las rocas 8-Tu y 9-Fr, además de esta pérdida de material en vértices y arista, tienen en algunas de las caras descamaciones submilimétricas paralelas a la estratificación.



Figura VII-10: Aspecto de una de las probetas de la roca 9-Fr en los ciclo 0 (foto izquierda) y 30 (foto derecha) de cristalización de sales.

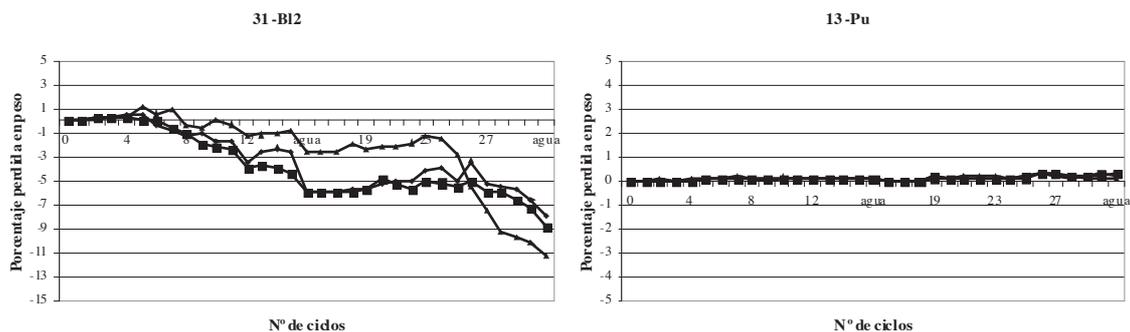


Figura VII-11: Gráfica de variación en peso para probetas de la roca 31-BI2 (Grupo A) y 13-Pu (Grupo B).

VII.2.1.2.- Variación en las propiedades hídricas tras el ensayo de cristalización de sales.

El avance de la alteración en los materiales pétreos genera importantes cambios en su sistema poroso. Por ello, se ha puesto un especial énfasis en la variación que tiene lugar en las propiedades hídricas del material tras los fenómenos de cristalización de sales. Estas variaciones aportan información no sólo sobre el grado de alteración, sino también sobre su durabilidad.

En la tabla VII-3 se presenta la variación en porcentaje tras el ensayo de cristalización de sales del contenido en humedad, porosidad abierta y del coeficiente de absorción capilar. Estos parámetros han sido calculados sobre las mismas probetas antes y después del ensayo de cristalización de sales. Los ensayos hídricos tras cristalización de sales no se han realizado sobre las arenitas, debido a su alto grado de deterioro que originaba una continua pérdida de material durante la realización de los mismos.

El ensayo de cristalización de sales ha provocado aumentos superiores al 30% en la porosidad abierta en 12-Ca, aumentos comprendidos entre el 10 y el 30% en 8-Tu, 9-Fr, 29-A, 30-D y 31-BI2 y aumentos inferiores al 10% en 18-VI-II, 28-Crt, 31-BI1 y 31-BI3. El aumento en la porosidad abierta es consecuencia tanto de la génesis de nuevos espacios vacíos por las presiones ejercidas por la cristalización de las sales, como por las disoluciones inducidas. Las rocas 16-VI-I, 27-Tr, 13-Pu, 17-CFI y 17-CFS presentan una ligera disminución en la porosidad abierta tras la cristalización de sales, como consecuencia de la obturación de parte de su sistema poroso por las sales cristalizadas.

Las variaciones en el coeficiente de absorción capilar tras la cristalización de sales han permitido evaluar los cambios en la cinética de los procesos de transmisión de fluidos. Este coeficiente aumenta de manera importante en las rocas 13-Pu, 17-CFS, 16-VI-I (figura VII-12), 27-Tr, 28-Crt y 29-A, mientras que en 8-Tu y 31-BI2 han tenido lugar aumentos más moderados.

En el resto de las rocas caracterizadas (9-Fr (figura VII-12), 12-Ca, 17-CFI, 18-VI-II, 30-D, 31-BI1 y 31-BI3) la variación en el coeficiente de absorción capilar ha sido poco significativa. En el anexo 2 se muestran las gráficas de absorción capilar para todas las rocas caracterizadas tras el ensayo de cristalización de sales.

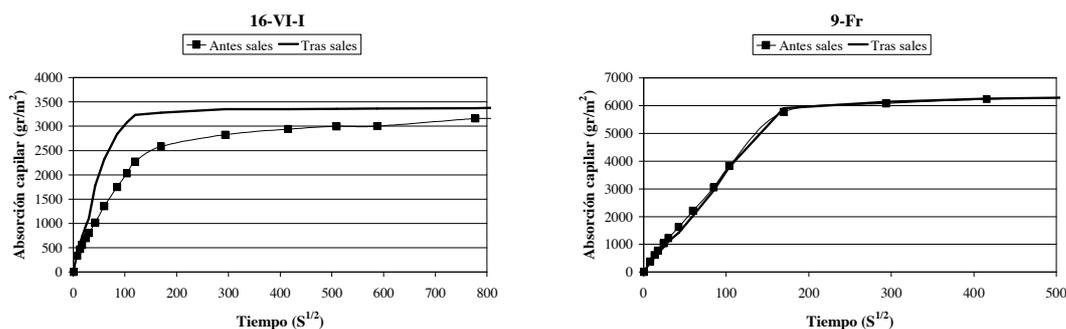


Figura VII-12: Curvas de absorción capilar de las rocas 16-VI-I y 9-Fr antes y después del ensayo de cristalización de sales. Cada curva representa el valor medio de tres probetas.

Tabla VII-3: Valores iniciales, finales y variación en porcentaje tras la cristalización de sales del contenido en humedad (W), porosidad abierta (P₀) y del coeficiente de absorción capilar (C.A.C.).

	Contenido en humedad- W			Porosidad abierta- P ₀			Coeficiente de absorción capilar C.A.C.		
	Inicial (%)	Tras sales (%)	Variación (%)	Inicial (%)	Tras sales (%)	Variación (%)	Inicial gm ² s ^{-0,5}	Tras sales gm ² s ^{-0,5}	Variación (%)
8-Tu	9,35	10,54	12,73	16,65	21,39	28,47	96,18	114,26	18,80
9-Fr	5,11	5,80	13,50	11,71	12,92	10,33	37,08	36,82	-0,70
12-Ca	0,24	0,31	29,17	0,64	1,04	62,50	0,88	0,90	2,85
13-Pu	0,95	0,90	-5,26	2,57	2,43	-5,45	1,05	2,48	136,25
28-Crt	1,48	1,51	2,03	3,98	4,04	1,51	2,27	4,57	101,59
29-A	0,34	0,39	14,71	0,92	1,05	14,13	1,31	1,99	51,78
16-VI-I	3,34	2,99	-10,48	8,45	7,48	-11,48	16,43	29,91	82,10
17-CFI	3,92	3,70	-5,61	9,17	8,64	-5,78	27,97	28,10	0,44
17-CFS	1,25	1,25	0,00	3,27	3,18	-2,75	6,05	10,97	81,43
18VI-II	1,48	1,52	2,70	3,47	3,70	6,63	36,66	36,37	-0,78
27-Tr	0,87	0,80	-8,05	2,22	2,01	-9,46	8,47	12,65	49,34
30-D	1,58	1,88	18,99	4,09	4,83	18,09	10,4	8,96	-13,82
31-BI1	3,33	3,67	10,21	8,13	8,92	9,72	13,21	12,43	-5,87
31-BI2	4,80	5,48	14,17	11,34	12,78	12,70	27,85	32,87	18,01
31-BI3	3,65	3,79	3,84	8,77	9,09	3,65	35,69	37,62	5,43

En la tabla VII-4 se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación para los ensayos hídricos de los diferentes materiales antes y después de la cristalización de sales. Los valores de estos coeficientes indican que la alteración tras la cristalización de sales no produce un cambio en el comportamiento del material, manteniéndose valores similares antes y después del ensayo.

Tabla VII-4: Valores del coeficiente de variación y de la desviación estándar para el contenido en humedad y el coeficiente de absorción capilar antes y después del ensayo de cristalización de sales.

	Absorción				Coeficiente de absorción capilar			
	Antes cristalización sales		Tras cristalización sales		Antes cristalización sales		Tras cristalización sales	
	Des. estándar	Coef. variación	Des. estándar	Coef. variación	Des. estándar	Coef. variación	Des. estándar	Coef. variación
8-Tu	0,25	0,02	0,18	0,02	4,76	0,05	1,32	0,01
9-Fr	0,28	0,05	0,07	0,01	1,45	0,04	2,01	0,05
12-Ca	0,08	0,32	0,12	0,30	0,27	0,30	0,29	0,32
13-Pu	0,08	0,08	0,10	0,11	0,29	0,27	0,42	0,17
28-Crt	0,03	0,02	0,03	0,02	0,33	0,15	0,34	0,07
29-A	0,02	0,06	0,04	0,10	1,04	0,79	1,13	0,57
16-VI-I	0,48	0,14	0,38	0,13	5,71	0,35	3,08	0,10
17-CFI	0,47	0,12	0,68	0,18	5,28	0,19	5,21	0,19
17-CFS	0,17	0,13	0,14	0,11	1,42	0,24	1,74	0,16
18-VI-II	0,54	0,36	0,30	0,20	9,89	0,27	7,08	0,19
27-Tr	0,20	0,23	0,11	0,14	6,15	0,73	6,32	0,50
30-D	0,03	0,02	0,04	0,02	0,99	0,10	0,34	0,04
31-B11	1,14	0,34	1,13	0,31	6,87	0,52	5,62	0,45
31-B12	0,42	0,09	0,06	0,01	6,85	0,25	8,90	0,27
31-B13	0,50	0,14	0,46	0,12	6,30	0,18	7,28	0,19

VII.2.2.- Ensayo de cristalización de sales no normalizado.

La evaluación de la durabilidad de estas rocas frente al ensayo de cristalización de sales, y dado el buen comportamiento general que han mostrado las rocas carbonatadas frente al ensayo de cristalización de sales normalizado, se ha completado con la caracterización de las variaciones que tienen lugar en la absorción y en la permeabilidad tras la realización de 5 ciclos de cristalización de sales con dos soluciones salinas diferentes, una de NaCl y otra de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, y con dos concentraciones diferentes: 5% y 15%. Cada uno de estos 5 ciclos sucesivos consta de 2 partes:

1 Inmersión en solución salina durante 8 horas.

2 Secado durante 20 días a temperatura y humedad constantes (temperatura 23 ± 2 °C y humedad relativa $25 \pm 5\%$).

Estas soluciones salinas presentan un comportamiento diferente. El sulfato magnésico es menos móvil que el cloruro de sodio y presenta una tendencia a concentrarse inmediatamente debajo de la superficie expuesta del material (Davison, 1986), mientras que el cloruro de sodio se distribuye de manera más heterogénea en el interior del material pétreo.

Al igual que la porosidad, la permeabilidad es un parámetro que va cambiando conforme avanza la alteración del material, por ello la permeabilidad es una propiedad física de las rocas que permite evaluar las modificaciones que tienen lugar en el sistema poroso durante los procesos de alteración. Esta técnica se ha utilizado con el objetivo de caracterizar el movimiento de las soluciones en el interior de los materiales pétreos y la susceptibilidad a la alteración de la piedra natural.

La reducción de la permeabilidad del material es consecuencia de la génesis de costras superficiales y de la acumulación de sales en los poros más superficiales del material por el predominio de los procesos de precipitación de sales y sellado superficial (passive pore filling). Esta acumulación de sales puede actuar como un llenado pasivo de los poros por la inmersión sucesiva de las muestras en soluciones salinas que inhiben la futura alteración (Smith & McAlister, 1986).

El aumento en la permeabilidad del material es consecuencia del predominio del proceso de cristalización de sales y génesis de nuevos poros y/o fisuras en el interior del material pétreo o del ensanchamiento de las previas debido a la presión ejercida por las sales durante su cristalización (Smith *et al.*, 2005), lo que lleva asociado una disminución en la resistencia mecánica del material.

VII.2.2.1.- Variación en la porosidad tras la cristalización de sales.

Ambas sales han provocado un aumento en la porosidad abierta de las rocas excepto en 12-Ca y 31-B13. Este aumento en la porosidad ha sido mayor tras aplicar las soluciones salinas con concentración del 15% (tabla VII-5). Después de sumergir las probetas en solución de MgSO_4 al 15% tiene lugar un aumento en la porosidad comprendido entre el 5 y el 10% en 8-Tu, 28-Crt, 30-D, 31-B11 y 31-B12, aumentos inferiores al 5% en 9-Fr, 13-Pu y 16-VI-I y reducciones en 12-Ca, 29-A y 31-B13. Tras la cristalización de NaCl al 15% tiene lugar un aumento en la porosidad superior al 5% en 8-Tu y 29-A, aumentos inferiores al 5% en 9-Fr, 13-Pu, 28-Crt, 30-D, 31-B11 y reducciones en 12-Ca, 16-VI-I, 31-B12 y 31-B13.

Tras la cristalización de cloruro de sodio tienen lugar aumentos en la porosidad menos importantes que los ocasionados por la cristalización del sulfato magnésico en todas las rocas caracterizadas, con la excepción de la roca 29-A.

Tabla VII-5: Variación en la porosidad respecto al material inalterado tras la cristalización de sales de sulfato de magnesio y cloruro sódico al 5% y al 15%.

	MgSO ₄ 15%	NaCl 15%	MgSO ₄ 5%	NaCl 5%
8-Tu	8,56	6,04	3,87	2,03
9-Fr	3,34	2,45	-0,01	-0,04
12-Ca	-9,79	-7,12	-8,08	-7,26
13-Pu	4,18	2,41	1,68	2,16
28-Crt	8,36	4,26	2,31	0,23
29-A	-6,20	12,93	0,91	-3,10
16-VI-I	1,07	-2,37	-2,69	-7,10
30-D	9,42	3,61	3,64	0,55
31-B11	8,60	3,52	0,39	-1,57
31-B12	7,21	-0,55	0,28	7,51
31-B13	-0,19	-0,11	-0,14	-0,33

VII.2.2.2.- Variaciones en la permeabilidad tras la cristalización de sales.

VII.2.2.2.1.- Variaciones globales en la permeabilidad.

Para cada tipo de roca, y con el objeto de investigar la variación espacial de la permeabilidad tras los procesos de cristalización de sales, se ha elaborado un resumen estadístico con los valores de permeabilidad, se han construido histogramas de frecuencia, se han calculado los variogramas y se han definido los mapas de permeabilidad. Las diferencias existentes entre la permeabilidad antes y después de la alteración del material (tabla VII-6) se deben únicamente a las variaciones que han tenido lugar en el sistema poroso tras los procesos de cristalización de sales.

Tabla VII-6: Variación en porcentaje de la permeabilidad en cada una de las caras caracterizadas tras el ensayo de cristalización de sales.

	MgSO ₄ 15%		NaCl 15%		MgSO ₄ 5%		NaCl 5%	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
8-Tu	12,21	23,20	3,05	-3,20	9,92	18,03	6,11	13,11
9-Fr	5,22	8,82	6,72	6,62	-1,49	6,62	8,21	5,15
12-Ca	-7,75	-15,73	-11,57	-19,64	-9,74	-15,40	-25,34	-13,96
13-Pu	-0,64	-4,48	-7,01	-11,44	-14,98	-13,19	-9,75	-14,90
28-Crt	-4,96	0,28	0,01	6,49	-18,50	-21,18	5,05	-3,46
29-A	19,93	34,30	23,53	28,47	-3,73	7,89	10,29	17,87
16-VI-I	10,94	8,27	24,26	-7,19	-14,17	-13,87	2,60	2,13
30-D	17,87	20,45	24,97	16,07	11,38	10,35	20,05	13,58
31-B11	38,73	29,74	28,02	7,28	35,48	34,74	25,94	17,03
31-B12	0,37	6,99	2,89	3,75	7,12	-8,63	4,80	2,24
31-B13	-10,62	-6,69	16,57	-0,02	-22,97	-19,95	-4,37	-3,85

En general, los valores medios de variación en la permeabilidad obtenidos para cada roca (tabla VII-7) indican un aumento en la permeabilidad con el incremento en la concentración de las soluciones salinas. Por ello, los resultados obtenidos tras la cristalización de las soluciones de cloruro sódico y de sulfato magnésico al 15% van a ser los utilizados en los siguientes apartados para valorar el deterioro de estos materiales en los estadios iniciales de la alteración.

Tabla VII-7: Variación en porcentaje de la permeabilidad media tras la cristalización de sales.

	MgSO ₄ 15%	NaCl 15%	MgSO ₄ 5%	NaCl 5%
8-Tu	17,71	0,07	13,98	9,61
9-Fr	7,02	6,67	2,56	6,68
12-Ca	-11,74	-15,61	-12,57	-19,65
13-Pu	-2,56	-9,22	-14,08	-12,33
28-Crt	-2,34	3,25	-19,84	0,80
29-A	27,11	26	2,08	14,08
16-VI-I	9,6	8,54	-14,02	2,37
30-D	19,16	20,52	10,86	16,82
31-B11	34,23	17,65	35,11	21,49
31-B12	3,68	3,32	-0,75	3,52
31-B13	-8,66	8,27	-21,46	-4,11

Tras la cristalización del sulfato magnésico al 15% tiene lugar un aumento en la permeabilidad media superior al 10% en las rocas 8-Tu, 29-A, 30-D y 31-B11, un aumento inferior al 10% en las rocas 9-Fr, 16-VI-I y 31-B12 y una disminución en la permeabilidad media en las rocas 12-Ca, 13-Pu, 28-Crt y 31-B13.

Tras la cristalización del cloruro sódico al 15% tiene lugar un aumento en la permeabilidad media superior al 10% en las rocas 29-A, 30-D y 31-B11, un aumento inferior al 10% en las rocas 8-Tu, 9-Fr, 16-VI-I, 28-Crt, 31-B12 y 31-B13 y una disminución en la permeabilidad media en las rocas 12-Ca y 13-Pu.

La cristalización de las soluciones salinas también conlleva un aumento en la anisotropía en algunas de las rocas caracterizadas (tabla VII-8), lo que indica un control por parte de las características texturales de la roca en la acumulación y/o cristalización de las sales.

Tras la cristalización de cloruro de sodio tiene lugar un aumento importante en los valores de anisotropía respecto a la roca fresca en 8-Tu, 16-VI-I, 31-B1-1 y 31-B1-3, mientras que tras la cristalización de sulfato magnésico tiene lugar un importante aumento en la anisotropía en las rocas 9-Fr y 31-B1-2.

Tras la cristalización de ambas sales tiene lugar una importante disminución en la anisotropía de la roca 12-Ca que era la única roca que presentaba una fuerte anisotropía antes de su alteración.

Tabla VII-8: Valores de anisotropía tanto para la roca inalterada como para la roca alterada con las distintas soluciones.

	Inalterado	MgSO ₄ 15%	NaCl 15%	MgSO ₄ 5%	NaCl 5%
8-Tu	4,58	0	10,37	4,55	0,72
9-Fr	1,47	8,97	1,38	4,72	1,38
12-Ca	10,88	4,91	1,93	2,43	1,98
13-Pu	0,65	2,7	4,13	3,24	5,08
28-Crt	0,3	0,05	25,53	2,7	0,76
29-A	2,87	6,07	3,3	2,43	10,74
16-VI-I	4,53	6,53	0,72	6,46	1,99
30-D	1,49	0,56	5,72	3,6	3,96
31-B11	0,98	0,44	15,37	5,56	6,15
31-B12	2,95	17,22	2,14	3,33	5,33
31-B13	0,33	3,44	14,52	3,9	0,21

VII.2.2.2.2.- Variaciones en la permeabilidad en cada material pétreo.

Al igual que en el material sin alterar, la medida de la permeabilidad tras la cristalización de sales se ha realizado en dos caras contiguas de cada material. 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 \parallel (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 \parallel en cada una de las rocas caracterizadas, así como los componentes de los variogramas de las rocas en las que ha sido posible su elaboración, se presentan en las tablas VII-9 y VII-10, respectivamente. Aquellas rocas en las que no ha sido posible ajustar el variograma, es consecuencia de la ausencia de 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 las figuras VII-13 y VII-14 se muestra un ejemplo de las fichas elaboradas para cada una de estas rocas tras la cristalización de las soluciones de sulfato magnésico y de cloruro sódico, respectivamente; mientras que en el anexo 3 se recogen las fichas de todas las rocas caracterizadas.

Sigla: 31-B11

Tras el ensayo de cristalización de sales con MgSO₄.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 139,67 mD.

Permeabilidad: 131,91 mD.

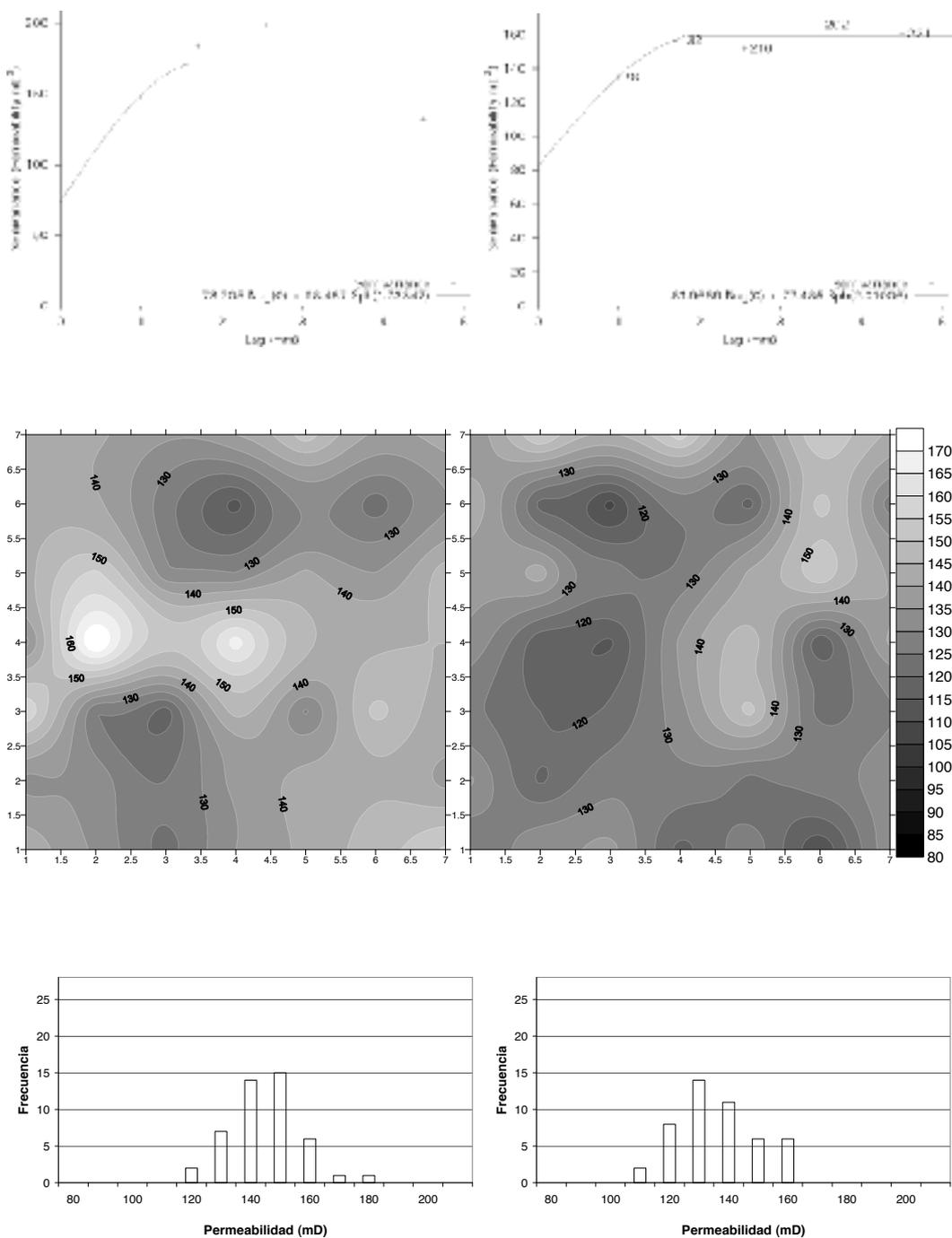


Figura VII- 13: Ficha de la roca 31-B11 con los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas tras la cristalización del sulfato magnésico heptahidratado.

Sigla: 31-B11

Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara \perp

Permeabilidad: 128,89 mD.

Permeabilidad: 109,08 mD.

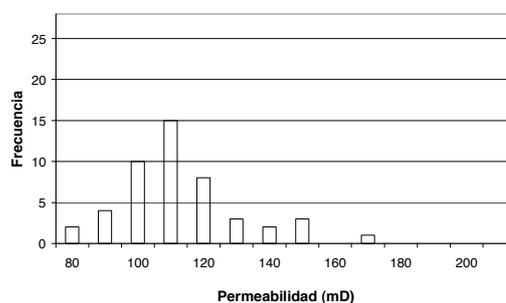
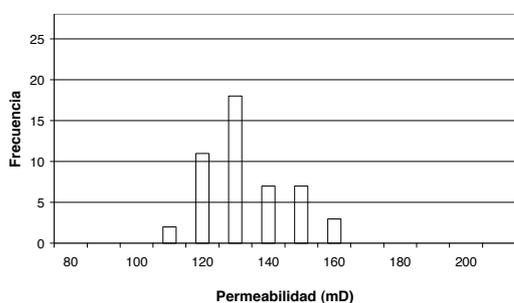
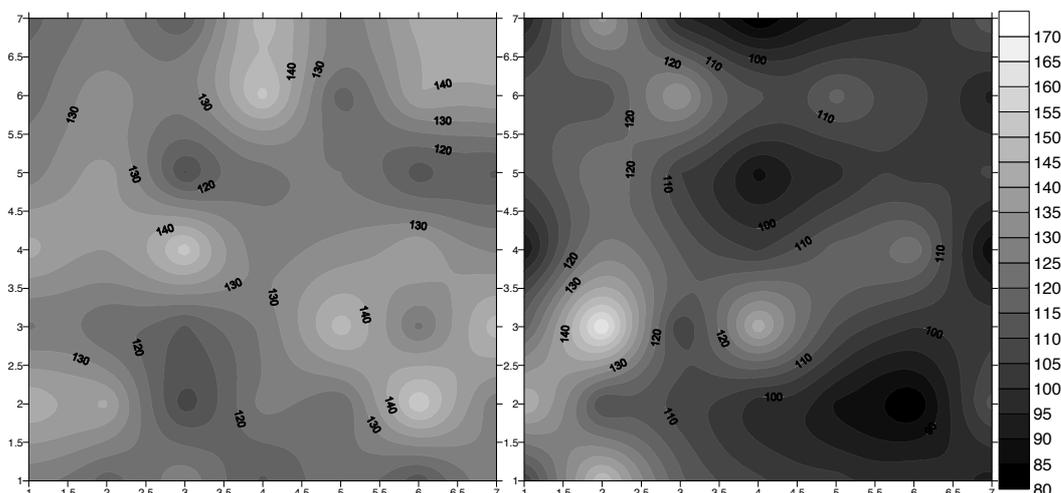
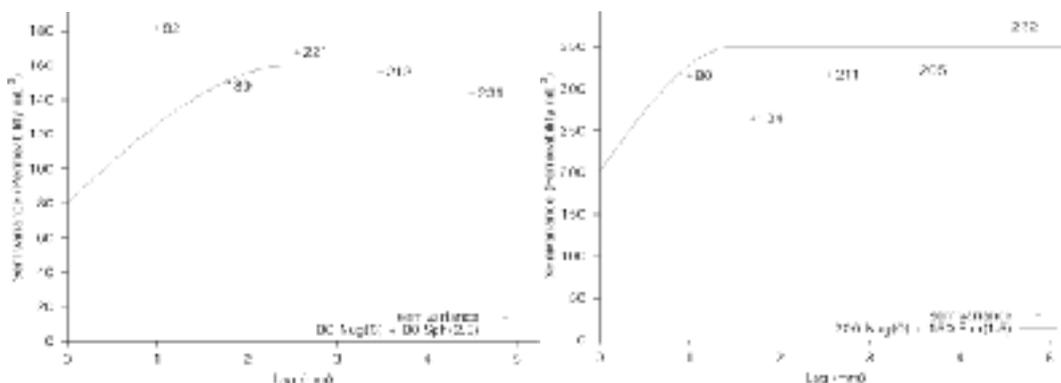


Figura VII- 14: Ficha de la roca 31-B11 con los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las caras caracterizadas tras la cristalización del cloruro sódico.

12-Ca Nombre científico: Biopelmicrita-Packstone de peloides y pelecípodos.

Localidad: Calatorao.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	107,39	94,96	99,07	120,5	96,84	101,54
Rango	49,3	52,7	44,3	54	43	52,5
Mínimo	85,7	76,3	79,7	85	77	75,5
Máximo	135	129	124	139	120	128
Mediana	105	92,5	97,6	119	96,6	99,5
Des. Std.	12,11	10,85	9,35	11,24	11,12	14,48
Coef. Variación	0,11	0,11	0,09	0,09	0,11	0,14
Coef. Asimetría	0,27	0,91	0,55	-0,84	0,12	0,25

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
// NaCl	97,35	40,13	137,49	2,21	70,81
⊥ MgSO ₄	137,8	92,19	229,99	4,0	59,91

En la roca 12-Ca tiene lugar una reducción en la permeabilidad media y en la anisotropía de la permeabilidad tras la cristalización de ambas sales. La reducción de la permeabilidad respecto al material inalterado ha dependido del tipo de sal utilizado, siendo de 15,61% tras la cristalización de la solución de NaCl y de 11,74% tras la cristalización de la solución de MgSO₄·7H₂O. Esta reducción en la permeabilidad del material es el resultado del sellado parcial del sistema poroso por la cristalización de sales, lo que implica un dominio de los procesos de obturación de la porosidad inicial del material.

El resumen estadístico muestra como tras la cristalización de sales se produce una homogenización en los valores de permeabilidad, con una disminución tanto en el rango como en los valores máximos y mínimos para ambas sales. También es significativo el cambio que tiene lugar en los histogramas, presentando asimetrías positivas mayores tras los procesos de cristalización de sales.

Los variogramas realizados tras la cristalización de sales, y a diferencia de los variogramas de la muestra inalterada, muestran un ligero control estructural para la distribución de la permeabilidad con ambas sales. En ambos casos, el elevado efecto pepita indica la existencia de una alta variabilidad. Estos cambios indican que la cristalización de sales en esta caliza disminuye la variabilidad espacial de la permeabilidad.

Los mapas de permeabilidad muestran como las zonas de mayor permeabilidad tras la cristalización de las sales de sulfato de magnesio se sitúan en las zonas centrales de las caras caracterizadas. Este hecho indica como las sales, durante el proceso de secado del material, han migrando y se han acumulado preferentemente en los límites de las probetas, creando zonas de baja permeabilidad por la obturación del sistema poroso como consecuencia del dominio de los procesos de acumulación de sales sobre los procesos de cristalización de sales y génesis de nuevos poros y/o fisuras.

13-Pu Nombre científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides.

Localidad: La Puebla de Albortón.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	129,07	120,02	128,25	129,93	115,06	124,11
Rango	42	49,9	43	43	69,3	51,5
Mínimo	110	91,1	107	113	69,3	93,5
Máximo	152	141	150	156	155	145
Mediana	128	121	129	130	115,06	128
Des. Std.	8,49	13,82	9,06	6,70	15,84	13,09
Coef. Variación	0,06	0,11	0,07	0,05	0,14	0,10
Coef. Asimetría	0,18	-0,51	-0,15	0,95	0,73	-0,76

La roca 13-Pu presenta tras la cristalización de ambas sales una reducción en su permeabilidad media. Esta reducción es del 9,22% tras la cristalización de la solución de NaCl y del 2,56% tras la cristalización de la solución de MgSO₄.7H₂O. El proceso dominante en esta roca es el de sellado y obturación de su porosidad inicial.

El resumen estadístico tras la cristalización de sales indica un aumento en el rango tras la alteración del material. Los histogramas muestran para ambas sales una reducción en los valores de asimetría positiva que se presentaban inicialmente para ambas caras.

Los variogramas calculados tras la cristalización de sales, y a diferencia de los variogramas de la muestra inalterada, no muestran ningún tipo de control estructural para la distribución de la permeabilidad, lo que implica un aumento en la variabilidad espacial tras la cristalización de sales.

Las zonas de máxima permeabilidad, al igual que en el material inalterado, corresponden a las galerías de bioturbación. En estas zonas la matriz ha sufrido una recristalización a microesparita y pseudoesparita.

El aumento del rango tras la cristalización de sales en esta roca es consecuencia del descenso en los valores mínimos de permeabilidad por obturación de parte del sistema poroso en las zonas no bioturbadas. Por el contrario, en las zonas bioturbadas tiene lugar un aumento en el porcentaje de valores de mayor permeabilidad, por lo que estas zonas van a ser las zonas preferentes para la cristalización de sales y alteración del material.

16-VI-I Nombre científico: Sparstone.**Localidad:** Villarluego.**Tabla VII-9:** Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	124,41	154,59	138,02	124,03	115,12	134,3
Rango	37	94	41	74,5	45,7	53
Mínimo	107	112	117	99,5	92,3	113
Máximo	144	206	158	174	138	166
Mediana	125	152	145	122	116	133
Des. Std.	7,31	22,51	8,78	14,55	11,04	12,24
Coef. Variación	0,06	0,14	0,06	0,12	0,09	0,09
Coef. Asimetría	0,09	0,28	-0,25	1,79	0,02	0,55

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥ NaCl	89,01	44,38	133,39	3,18	66,73
// NaCl	66,89	645,97	712,86	6,28	9,38
⊥ MgSO ₄	53,21	102,51	155,72	2,15	34,17
// MgSO ₄	54,88	32,51	87,39	6,33	62,81

La roca 16-VI-I presenta un aumento del 9% en su permeabilidad media tras el ensayo de cristalización con ambas sales. En esta roca, el proceso predominante es la precipitación de sales con génesis y/o ensanchamiento de poros y fisuras previas.

El resumen estadístico tras la cristalización de sales indica que con ambas sales tiene lugar un aumento en el rango de la permeabilidad en la cara // y una disminución en la cara ⊥. Los histogramas también presentan importantes cambios en sus valores de asimetría, siendo especialmente notables para la cara ⊥.

Los variogramas elaborados tras la cristalización de sales indican la existencia de un fuerte control por la propia fábrica de la roca en la alteración independientemente del tipo de sal utilizado. Con ambas sales, los variogramas muestran un rango de 6 cm para las caras // y un rango de 2-3 cm para las caras ⊥. Los variogramas de la cara // para ambas sales son exponenciales y sus elevados rangos indican una alta variabilidad de la permeabilidad con un incremento continuo en la variación.

El elemento textural que está controlando la permeabilidad en esta roca es la variación de tamaño de los cristales de calcita resultante de los procesos de recristalización y cementación. El rango, en los variogramas, indica la distancia a la que dos medias son independientes una de la otra. El estudio petrográfico indica que los parches esparíticos subparalelos a los planos de estratificación se corresponden con las zonas de menor permeabilidad, mientras que las zonas de alta permeabilidad coinciden con niveles microesparíticos.

28-Crt Nombre científico: Biomicrita-Wackstone Bioclástico.

Localidad: Tortajada.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	126,97	126,97	125,91	120,5	131,32	120,67
Rango	28	55	43	54	42	50
Mínimo	114	105	105	85	109	95
Máximo	142	160	148	139	151	145
Mediana	127	128	126	119	132	120
Des. Std.	6,21	12,51	8,88	11,24	9,52	13,21
Coef. Variación	0,05	0,09	0,07	0,09	0,07	0,11
Coef. Asimetría	-0,08	0,69	-0,02	-0,83	-0,36	-0,08

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥ NaCl	75,98	78,06	154,04	2,21	49,38
⊥ MgSO ₄	87,17	75,56	162,73	2,85	53,56

En la roca 28-Crt tras la cristalización de sales tiene lugar una ligera variación en la permeabilidad, con un aumento del 3,25% tras la cristalización del cloruro de sodio y una disminución del 2,34% tras la cristalización del sulfato magnésico heptahidratado.

El resumen estadístico tras la cristalización de sales indica que con ambas sales tiene lugar un aumento en el rango de la permeabilidad en la cara // y una ligera disminución en la cara ⊥. Los histogramas presentan importantes cambios en sus valores de asimetría pasando de asimetrías negativas a histogramas con asimetrías positivas o negativas con valores inferiores.

Los variogramas elaborados tras la cristalización de sales indican que para ambas sales se mantiene el control estructural que presentaba la roca inalterada en la cara ⊥ y se mantiene sin control estructural en la cara //. Tras la alteración con ambas sales aumenta la variabilidad espacial de la permeabilidad, presentando unos valores de efecto pepita ostensiblemente superiores, aunque el rango se mantiene en torno a los 2-3 cm. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que el elemento textural que está jugando un papel importante en la variación de la permeabilidad son las variaciones en el tamaño de la micrita y los parches esparíticos.

Al igual que los mapas de permeabilidad, los variogramas en la cara ⊥ indican un control en la distribución de la permeabilidad, mostrando los valores máximos de permeabilidad en bandas paralelas a la estratificación del material y espaciadas de 2 a 3 cm.

29-A Nombre científico: Biopelmicrita-Wackstone de bioclastos y peloides.**Localidad:** Abanto.**Tabla VII-9:** Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	101,74	125,67	122	97,12	124,77	130,43
Rango	57,5	54,1	47	41,6	53	46
Mínimo	73,5	94,9	96	79,4	96	103
Máximo	131	149	143	121	149	149
Mediana	98,5	125	121	93,8	126	135
Des. Std.	15,71	12,22	9,65	11,28	11,66	11,40
Coef. Variación	0,15	0,1	0,08	0,12	0,093	0,09
Coef. Asimetría	0,22	-0,43	-0,08	0,50	-0,38	-0,72

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥ NaCl	72,86	61,19	134,06	2,4	54,35

En la roca 29-A tras la cristalización de ambas sales tiene lugar un aumento en la permeabilidad media del 26%. En esta roca, los procesos dominantes han sido los de génesis y/o apertura de poros y/o fisuras en el interior del material pétreo debido a la presión ejercida por las sales durante su cristalización.

El resumen estadístico tras la cristalización de sales indica que con ambas sales tiene lugar un aumento tanto en los valores mínimos como en los valores máximos de permeabilidad, aunque no tienen lugar variaciones importantes en el rango. Los histogramas también presentan importantes cambios en sus valores de asimetría respecto al material inalterado, pasando de presentar asimetrías positivas a histogramas con asimetrías negativas.

Los variogramas indican una carencia de control estructural tras la cristalización de sulfato de magnesio, indicando un aumento de la variabilidad espacial en la permeabilidad. En cambio, tras la cristalización de cloruro de sodio, el variograma muestra una disminución en la variabilidad espacial respecto al material inalterado. Estos datos, junto con el estudio petrográfico, han permitido determinar que la cristalización de sales en esta roca tiene lugar preferentemente a favor de las juntas estilolíticas, siendo éste el elemento textural que controla la variabilidad espacial de la permeabilidad. El rango, 2,4 cm, indica el espaciado medio de las discontinuidades en la roca. En esta roca es posible predecir las variaciones en las propiedades del material e identificar las áreas con una mayor alterabilidad potencial.

30-D Nombre científico: Sparstone.

Localidad: Abanto

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	112,64	140,78	132,78	114,35	132,73	137,74
Rango	36,8	53	49	51,6	63	95
Mínimo	96,2	114	113	82,4	110	103
Máximo	133	167	162	134	173	198
Mediana	114	141	131	115	129	136
Des. Std.	9,8	12,64	11,52	11,25	12,16	16,46
Coef. Variación	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,12
Coef. Asimetría	-0,01	0,15	0,69	-0,46	1,54	0,9

En la roca 30-D tras la cristalización de sales tiene lugar un importante aumento en la permeabilidad, siendo del 20,52 % tras la cristalización del cloruro sódico y del 19,16% tras la cristalización del sulfato magnésico. Este aumento en los valores de permeabilidad indica que han dominado los procesos de génesis y/o apertura de poros y/o fisuras en el interior del material pétreo debido a la presión ejercida por las sales durante su cristalización.

Tras la cristalización de sales tiene lugar un importante aumento en el rango de la permeabilidad, con un aumento muy acusado en los valores de alta permeabilidad. La alteración también conlleva un cambio en la simetría de los histogramas, pasando de presentar asimetrías negativas a asimetrías positivas.

A partir de los datos de permeabilidad obtenidos no es posible ajustar el variograma. Este hecho indica la inexistencia de un control estructural de la variación de la permeabilidad en la escala en la que estamos trabajando, por lo que se deduce que la variabilidad tiene lugar en una escala más pequeña que la considerada.

31-B11 Nombre científico: Dolosparstone.

Localidad: Blancas.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	100,68	128,89	139,67	101,68	109,08	131,91
Rango	36,5	48	65	49,3	86,4	50
Mínimo	82,5	107	113	82,7	79,6	108
Máximo	117	155	178	132	166	158
Mediana	99,9	127	140	99,5	106	129
Des. Std.	7,88	12,26	12,33	12,01	17,99	12,55
Coef. Variación	0,09	0,09	0,09	0,12	0,16	0,09
Coef. Asimetría	0,31	0,35	0,58	0,62	1,01	0,31

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
⊥ MgSO ₄	81,96	77,48	159,44	2,01	51,40
// MgSO ₄	73,20	98,48	171,69	1,73	42,64

En la roca 31-B11 tras la cristalización de sales tiene lugar un importante aumento en la permeabilidad, siendo del 17,65% y del 34,23% para la cristalización de cloruro de sodio y de sulfato magnésico, respectivamente. Este aumento en la permeabilidad indica el predominio de los procesos de génesis y/o ensanchamiento de poros y/o fisuras en el interior del material pétreo.

Tras la cristalización de sales tiene lugar un aumento muy importante tanto en los valores máximos de permeabilidad como en el rango. Los histogramas presentan unos coeficientes de asimetría positivos semejantes a los de la roca inalterada.

La tendencia de los variogramas de la roca inalterada no se modifica tras la cristalización de sulfato de magnesio, lo que nos indica que la alteración no cambia el modelo, es decir, no cambia las propiedades del material. El estudio al microscopio petrográfico pone de manifiesto que la bioturbación de pequeña escala presente en el material es el elemento textural que controla la variación espacial de la permeabilidad, siendo las zonas bioturbadas las que presentan unos valores de permeabilidad mas elevados. El rango, 1,73-2 cm, indica el espaciado medio entre las zonas bioturbadas.

31-BI2 Nombre científico: Dolosparstone.

Localidad: Blancas.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	130,30	134,06	130,78	126,45	131,19	135,29
Rango	47	48	51	58	51	110,2
Mínimo	108	114	104	99	99	91,8
Máximo	155	162	155	157	150	202
Mediana	129	134	129	128	133	136
Des. Std.	10,36	8,59	12,9	12,87	10,12	20,87
Coef. Variación	0,079	0,06	0,1	0,1	0,07	0,15
Coef. Asimetría	0,67	0,31	0,05	-0,29	-1,36	0,55

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
// NaCl	53,83	25,94	79,77	3,35	67,48
// MgSO ₄	77,86	98,69	176,56	1,51	44,1

En la roca 31-BI2 tras la cristalización de sales tiene lugar un ligero aumento en la permeabilidad del material, siendo del 3,32% y del 3,68% tras la cristalización de las soluciones de cloruro de sodio y de sulfato magnésico, respectivamente.

Tras la cristalización de sales, los resultados del resumen estadístico no muestran grandes cambios ni en los rangos ni en los valores máximos (el amplio rango indicado para la cara ⊥ tras la cristalización de sales de magnesio es consecuencia de la presencia de un único valor aislado de 202 mD como se observa en los histogramas).

Los variogramas indican una carencia de control estructural tras la cristalización de ambas sales en las caras ⊥, mientras que en las caras // sí lo presentan. Estos cambios indican que la alteración en esta roca disminuye la variabilidad espacial de la permeabilidad y que la alteración está teniendo lugar a favor de ciertos elementos texturales que pueden ser puntos potenciales de debilidad del material. Al igual que en la roca 31-BI1, el estudio al microscopio petrográfico ha puesto de manifiesto que la bioturbación de pequeña escala presente en el material y los parches esparíticos son los elementos texturales que controlan la variación espacial de la permeabilidad. El rango indica el espaciado medio entre las zonas bioturbadas.

31-BI3 Nombre científico: Dolosparstone.

Localidad: Blancas.

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	136,32	158,91	121,84	135,87	135,84	126,78
Rango	36	61	84,6	36	48	66,7
Mínimo	118	127	90,4	118	104	91,3
Máximo	154	188	175	154	152	158
Mediana	137	159	120	135	136	126
Des. Std.	6,33	13,26	17,55	8,85	11,47	14,84
Coef. Variación	0,05	0,08	0,14	0,06	0,08	0,12
Coef. Asimetría	-0,43	-0,3	0,67	0,23	-0,94	0,05

Tabla VII-10: Componentes del variograma.

Variogramas	Efecto pepita	Com. estructural	Meseta	Rango	Efecto pepita relativo %
// NaCl	105	83,31	188,77	2,05	55,87

En la roca 31-BI3 tras la cristalización de sales se genera un aumento en la permeabilidad del 8,27% tras la cristalización del cloruro sódico y una disminución del 8,66% tras la cristalización del sulfato magnésico.

Tras la cristalización del cloruro sódico los resultados del resumen estadístico muestran un aumento importante en el rango y en los máximos respecto al material inalterado, mientras que la asimetría de los variogramas se mantiene constante. El proceso predominante es la génesis y/o ensanchamiento de poros y/o fisuras en el interior del material pétreo.

El variograma tras la cristalización de cloruro de sodio muestra un aumento de la variabilidad espacial respecto al material inalterado, así como del rango (2,05 cm). Este rango, junto con el estudio petrográfico, indican que el elemento textural que está controlando la variación espacial de la permeabilidad son las variaciones que tienen lugar en el tamaño cristalino de la esparita y que aparece formando bandeados en el material. La cristalización preferente a favor de ciertos componentes texturales permite predecir las variaciones en las propiedades del material e identificar las áreas con una mayor alterabilidad potencial.

Tras la cristalización del sulfato de magnesio no se producen cambios importantes en los valores máximos de permeabilidad, pero sí tiene lugar un importante descenso en los valores mínimos. El proceso dominante es el de sellado y obturación de los poros de menor tamaño dado que los valores máximos de permeabilidad permanecen constantes. Además, tras la cristalización de sales desaparece el control estructural que existía en la roca inalterada.

8-Tu Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico

Localidad: Tudela

Tabla VII-9: Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	131,95	135,18	147,15	124,9	120,68	138,93
Rango	34	44	46	47	57	46
Mínimo	111	117	128	102	94	115
Máximo	145	161	174	149	151	161
Mediana	136,5	132,5	147,5	124	118,5	141,5
Des. Std.	11,26	10,72	10,84	14,99	18,16	13,96
Coef. Variación	0,08	0,08	0,07	0,12	0,15	0,10
Coef. Asimetría	-0,42	0,64	0,57	0,17	0,28	-0,80

En la roca 8-Tu tras la cristalización de sales de sulfato magnésico tiene lugar un aumento en la permeabilidad del 17,71%, mientras que la permeabilidad permanece estable tras la cristalización del cloruro sódico.

Los histogramas tras la cristalización de sulfato magnésico muestran un cambio en la tendencia hacia una distribución normal, mientras que tras la cristalización de cloruro sódico los histogramas tienen una asimetría positiva indicando la presencia de una elevada proporción de medidas de baja permeabilidad.

La distribución de las áreas de baja y alta permeabilidad en los mapas de permeabilidad indican que tras la cristalización de sales se mantiene el control estructural de la sedimentación primaria. El elemento textural que define la distribución de la permeabilidad es la orientación preferente de los bioclastos paralelos a la estratificación del material. En el caso del sulfato de magnesio, además de este control estructural, el secado condiciona el movimiento de las sales en el interior del material pétreo. En esta roca, los valores más altos de permeabilidad se localizan asociados a la laminación originada por la orientación de los bioclastos en la mitad superior de la probeta.

9-Fr Nombre científico: Biomicrita-Wackstone bioclástico.**Localidad:** Fraga.**Tabla VII-9:** Resumen estadístico de los parámetros obtenidos del ensayo de permeabilidad.

Cara	//			⊥		
	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄	Inalterado	15% NaCl	15% MgSO ₄
Media	134,72	142,63	141,2	135,95	163,04	148,21
Rango	34	89	55	56	74	86
Mínimo	119	111	117	109	107	119
Máximo	153	200	172	165	181	205
Mediana	133	145	140	137,5	170,5	144
Des. Std.	9,04	22,17	12,62	13,64	17,44	23,28
Coef. Variación	0,06	0,15	0,09	0,10	0,11	0,16
Coef. Asimetría	0,64	0,53	0,24	-0,01	-1,76	-1,31

En la roca 9-Fr tras la cristalización de sales tiene lugar un aumento en su permeabilidad del 7,02% y del 6,67% tras la cristalización del sulfato magnésico y del cloruro sódico, respectivamente.

Los histogramas tras la cristalización de ambas sales muestran cambios importantes. Los histogramas para las caras paralelas a la estratificación exhiben una distribución bimodal, mientras que los histogramas para las caras perpendiculares presentan una asimetría negativa debida a una amplia proporción de valores de alta permeabilidad.

Las principales características de esta roca que determinan las zonas de alta permeabilidad son la bioturbación por raíces y la laminación por cambios en la recristalización de la matriz. Además de este control estructural, y al igual que ocurre en 8-Tu tras la cristalización de sulfato de magnesio, las áreas de alta permeabilidad se localizan en la parte superior del bloque por la influencia del secado en la distribución de las sales en el interior del material pétreo.

VII.2.2.2.3.- Modelos globales de variación de la permeabilidad en los materiales pétreos tras cristalización de sales.

A) Modelo global de variación de la permeabilidad en los materiales pétreos tras cristalización de sales según las características del sistema poroso (tabla VII-11).

Tabla VII-11: Variaciones en la permeabilidad tras la cristalización de sales respecto de la roca fresca. Los materiales se han ordenado en tres grupos, siguiendo la clasificación fijada en función del porcentaje en volumen para las principales clases de tamaño de acceso de poro calculada por porosimetría de mercurio.

Grupos porosimetría mercurio	Rocas	Variación MgSO ₄ 15%	Variación NaCl 15%
GRUPO I (86% accesos de poro < 0,1 μm)	12-Ca	-11,74%	-15,61%
	13-Pu	-2,56%	-9,22%
	28-Crt	-2,34%	3,25%
	29-A	27,11%	26,00%
GRUPO II (65% accesos de poro en el rango 0,1-1 μm)	30-D	19,16%	20,52%
	31-B11	34,23%	17,65%
	8-TU	17,71%	0,07%
	9-Fr	7,02%	6,67%
GRUPO III (45% accesos de poro >1 μm)	31-B12	3,68%	3,32%
	31-B13	-8,66%	8,27%
	16-VI-I	9,60%	8,54%

GRUPO I

Los materiales pétreos pertenecientes a este grupo se caracterizan por presentar más de un 86% de sus tamaños de acceso de poro inferiores a 0,1 μm. Las rocas del grupo I salvo 29-A, muestran una disminución en la permeabilidad media tras la cristalización de sales. En estas rocas el proceso dominante es la precipitación de sales y sellado superficial (passive pore filling).

La roca 29-A se caracteriza por una configuración especial de su sistema poroso que consiste en un volumen del 86% de accesos de poro inferiores a 0,1 μm y, a su vez, un porcentaje superior al 10% de accesos de poro pertenecientes al rango 1-10 μm debidos a estilolitos y vénulas parcialmente rellenas. En esta roca, 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.

GRUPO II

Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan, y se diferencia 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.

Los materiales clasificados dentro del grupo II (8-Tu, 9-Fr, 30-D, 31-B11 y 31-B12) presentan un aumento en la permeabilidad tras la cristalización de sales independientemente de la sal utilizada. 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.

GRUPO III

Las rocas pertenecientes a este grupo se caracterizan por presentar más de un 45% de su volumen de accesos de poro mayores de 1 μm .

Los materiales clasificados dentro del grupo III tienen un comportamiento variable. La roca 16-VI-I exhibe un aumento en la permeabilidad media con ambas sales, mientras que en 31-B13 únicamente aparece un aumento en su permeabilidad media tras la cristalización del cloruro sódico.

B) Modelo global de variación de la permeabilidad en los materiales pétreos tras cristalización de sales según su clasificación textural.

Las biomicritas con porosidad inferior al 3% (12-Ca, 13-Pu y 28-Crt) presentan un descenso en la permeabilidad tras la aplicación de las soluciones salinas. Sin embargo, 29-A presenta un importante aumento en la permeabilidad tras los ciclos de cristalización de sales. Petrográficamente, esta caliza se diferencia de las otras biomicritas por sus abundantes fentes estilolíticos y vénulas parcialmente rellenas. Estas discontinuidades son zonas preferentes de acumulación de sales y a favor de ellas se han producido los procesos de cristalización y rotura con el consiguiente aumento de la permeabilidad en el material.

Las biomicritas con porosidad superior al 10% (8-Tu y 9-Fr) muestran un aumento de la permeabilidad tras la cristalización de sales, dependiendo la magnitud de dicho incremento de las características texturales de cada roca y de la sal utilizada.

En las rocas recristalizadas (salvo 31-B13 en el ensayo con sulfato magnésico) se aprecia un aumento en la permeabilidad tras los procesos de cristalización de sales que depende de las características intrínsecas del material.

VII.2.2.3.- Variaciones morfológicas.

Finalmente, la evaluación de los procesos de cristalización de sales se ha completado con las variaciones morfológicas que tienen lugar en dos variedades de caliza Campanil pertenecientes a una cantera navarra (8-Tu) y a otra aragonesa (9-Fr), debido a que hemos detectado una propiedad (expansión durante el secado en presencia de sales de magnesio) de consecuencias muy negativas para su uso constructivo.

En trabajos previos realizados por el equipo de investigación Arbotante en la Catedral de Tudela se constató que la roca 8-Tu presenta una patología durante el secado extremo del material en presencia de sales, que se caracteriza por su rapidez y agresividad y que tiene su origen en la cristalización de sales en el interior de su sistema poroso. Esta forma de deterioro posee una morfología semejante a una fracturación mecánica con superficies de rotura concoideas y bordes afilados.

Las principales expresiones morfológicas de este deterioro son función de la posición de la estratificación y del acabado de la pieza litológica (figura VII-15). Las roturas son semejantes a las que se producen en un ensayo de resistencia a la compresión, no obstante las cargas que sustentan están muy por debajo de la resistencia máxima de la caliza campanil. En la pilastra de la figura VII-15.2 los técnicos de la Institución Príncipe de Viana calcularon que la carga era de 70-80 Kg/cm², mientras que la resistencia de la roca es de unos 470 Kg/cm². Este cálculo descarta una rotura por carga que era lo que sugería la morfología de la fisura.

Cuando el sillar está colocado con la estratificación vertical, se desprenden lascas paralelas a la superficie del sillar (figura VII-15.1), mientras que cuando está colocado con la estratificación horizontal, el sillar se fisura en toda su espesor con planos que frecuentemente forman 60° con la horizontal (figura VII-15.2). El proceso es selectivo y afecta con mayor intensidad a las partes más aéreas como esquinas, columnas y partes con labra (volutas de capitel, narices, orejas, etc.) en contraposición a los paramentos planos o muros. En la decoración escultórica en piedra hay una tendencia al desprendimiento de los elementos labrados con relieve acusado (figura VII-15.3).

Se realizaron diferentes ensayos con las especies salinas más abundantes en la Catedral y se constató que las sales de sulfato magnésico generaban el mayor deterioro en la caliza Campanil. Esta patología ha existido desde la construcción de la catedral en el siglo XII, pero no es hasta el comienzo de los años 70 cuando se generaliza e incrementa la intensidad del deterioro como consecuencia de la introducción de magnesio en la Catedral en diferentes restauraciones por el uso generalizado de arenisca y cemento Pórtland.

Las rocas seleccionadas para investigar los fenómenos de expansión en presencia de sales han sido las calizas campaniles de la Depresión Terciaria del Ebro de Tudela (8-Tu) y Fraga (9-Fr). La elección ha pretendido operar con las metodologías más idóneas para obtener información sobre la génesis de la expansión. La caliza campanil de Fraga, desde el punto de vista geológico, es una caliza del Páramo con una edad y unas microfases semejantes a las de Tudela. La investigación realizada en esta tesis doctoral ha consistido en la caracterización cualitativa y cuantitativa del fenómeno de expansión que sufre la caliza campanil de Tudela (8-Tu) en presencia de sales, así como determinar si

caliza campanil aragonesa de la cantera de Fraga (9-Fr) presenta el mismo tipo de deterioro ya que supone un riesgo importante para su uso constructivo en obra civil moderna.



Figura VII-15: Expresión morfológica de la patología en función de la posición de la estratificación y del acabado de la pieza litológica.

VII.2.2.3.1.- Expansión lineal.

La expansibilidad puede ser definida como el incremento de volumen que experimenta un cuerpo sólido (Delgado, 2001) y es una propiedad que presentan los materiales rocosos como respuesta a diferentes tensiones que se pueden generar en su interior. Las variaciones volumétricas (expansiones y contracciones) a partir de los ciclos de humectación y secado causan importantes deterioros en los materiales pétreos (Wendler *et al.*, 1996) y se asocian a la hidratación de compuestos cristalinos y la adsorción y/o absorción de agua en los espacios existentes, siendo minerales de la arcilla, tales como la esmectita, la causa fundamental de los procesos de expansión.

Según Snethlage and Wendler (1997) los sistemas porosos presentan, en función del contenido de humedad, dos tipos de expansiones: "hygric" para contenidos de humedad inferiores al 95% y debida a la absorción de vapor de agua e "hydric" para contenidos en humedad superiores y por absorción de agua líquida. En principio, consideran estas expansiones como un proceso reversible, pero indican que tras un número repetido de ciclos de fatiga la expansión puede preservarse en el material.

En sistemas libres de sales se produce la expansión de la roca durante su saturación, y la contracción durante el secado. En sistemas contaminados por soluciones salinas de cloruro sódico, sulfato magnésico y nitrato cálcico el proceso de expansión tiene lugar, en contra de lo esperado, durante el secado y la contracción durante la humectación del material (Snethlage *et al.*, 1997). El mecanismo de expansión durante el proceso de secado no está todavía muy claro, pero podría ser explicado por la cristalización de sales en los poros de mayores dimensiones, como ocurre con el modelo de heladicidad (Fitzner and Snethlage, 1982) o por la formación de películas de sal que se adhieren estrechamente a los granos empujándolos mientras están creciendo (Pühringer *et al.*, 1985).

VII.2.2.3.1.- Discusión y resultados.

Los resultados del ensayo de expansión con agua destilada muestran un valor de expansión inferior al 1×10^{-4} , corroborando que la expansión que tiene lugar en esta roca no es consecuencia de la pequeña proporción de arcillas expansivas presentes. Los valores del residuo insoluble indican que se trata de calizas muy puras, presentando un porcentaje promedio de 2,44% y un valor máximo del 7%, correspondiendo un 1,5% a materia orgánica (máximo 2,6%) y el 1% restante a fracción silicatada. Dentro de la fracción silicatada destaca un 25% de filosilicatos frente a un 75% de cuarzo y feldespatos. Los filosilicatos son, por orden de abundancia, illita, clorita y esmectita.

La medida de la expansión no confinada durante el secado en estas calizas se ha cuantificado a temperatura ambiente en presencia de sales de sulfato de magnesio en un gran número de probetas con el objeto de obtener información sobre la magnitud de este proceso. El ensayo de expansión se ha realizado sobre tandas de 6 probetas y tomando 36 medidas en cada una de ellas. Los resultados obtenidos muestran como la caliza campanil de Tudela (8-Tu) presenta una expansión media de $43,56 \times 10^{-4}$ con unos valores comprendidos entre $29,85 \times 10^{-4}$ y $59,74 \times 10^{-4}$, mientras que la caliza campanil de Fraga (9-Fr) presenta una expansión media de $19,64 \times 10^{-4}$ con unos valores comprendidos entre $14,80 \times 10^{-4}$ y $23,82 \times 10^{-4}$.

Los resultados indican que la expansión en la roca 8-Tu es un 127,79% superior a la expansión que presenta la roca 9-Fr. Dada la mayor importancia de este fenómeno en la roca 8-Tu se ha llevado a cabo un ensayo de expansión automatizado de larga duración para obtener un modelo del comportamiento del material a lo largo del ensayo, caracterizando las variaciones longitudinales generadas durante la absorción de agua, absorción de soluciones salinas y secado de las probetas tras su saturación.

En las figuras VII-16 y VII-17 se presenta la gráfica de expansión lineal respecto al tiempo para una de las probetas de 8-Tu y las condiciones de temperatura y humedad relativa a lo largo de la duración del ensayo. En esta gráfica, se diferencian 8 ciclos de humectación secado. El primero de ellos se ha realizado con agua destilada y los 7 ciclos restantes con disoluciones de 50 gr/litro de sulfato de magnesio heptahidratado.

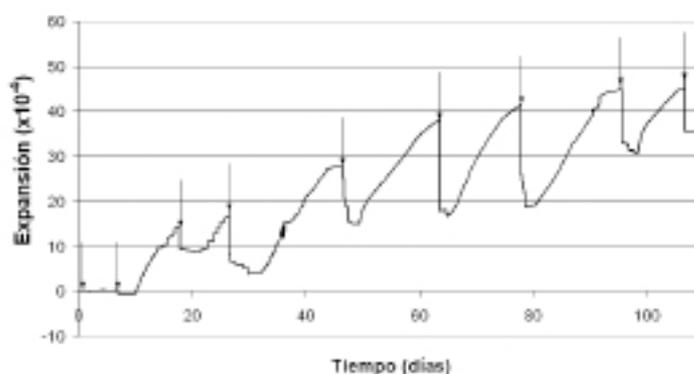


Figura VII-16: Gráfica de expansión lineal de una probeta de caliza campanil 8-Tu. Duración total del ensayo 110 días. Las flechas indican el momento en el que se sumergen las probetas en agua destilada en el ciclo 1 y en solución salina en el resto de los ciclos durante 24 horas.

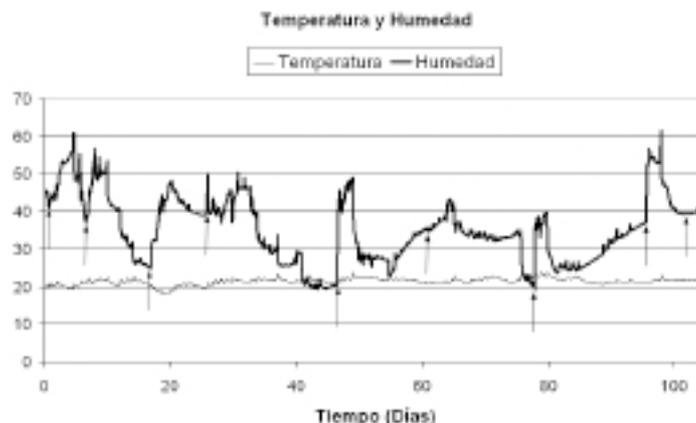


Figura VII-17: Curvas con la evolución de la temperatura y de la humedad relativa a lo largo del ensayo. Las flechas, al igual que en la figura 16, muestran el momento de la saturación del material.

En la tabla VII-12 se muestran los valores de expansión máxima y de expansión irreversible a la finalización de cada uno de los ciclos de expansión en la roca 8-Tu. La expansión máxima es el valor correspondiente a la que presenta la probeta al finalizar la etapa de secado, mientras que la expansión irreversible es la expansión del material inmediatamente posterior a la inmersión de la probeta. La diferencia entre ambas expansiones en cada ciclo no es una contracción absoluta del material, sino que es la suma del efecto debido tanto a la liberación de parte de las tensiones generadas durante la cristalización de las sales, como a la disolución de las sales que se habían podido alojar en el contacto entre la superficie de la probeta y el comparador.

Tabla VII-12: Valores de expansión máxima e irreversible para cada uno de los ciclos en el ensayo de expansión.

	Expansión máxima ($\times 10^{-4}$)	Expansión irreversible ($\times 10^{-4}$)
Ciclo 1	-0,02	0
Ciclo 2	14,5	9,4
Ciclo 3	16,7	4,2
Ciclo 4	27,3	15,7
Ciclo 5	38,4	17,3
Ciclo 6	41,5	18,6
Ciclo 7	45	30,9
Ciclo 8	44,9	35,4

Las expansiones máximas tienen lugar en la última fase de secado (figura VII-16). La expansión irreversible se va incrementando progresivamente conforme avanza el ensayo llegando a alcanzar un valor de expansión irreversible máxima de $35,4 \times 10^{-4}$ en esta probeta. En la figura VII-18 se presenta un esquema resumen del comportamiento de estas calizas durante un ciclo de expansión de una probeta sometida a registro continuo de su longitud que nos permite comprender la evolución temporal del proceso.

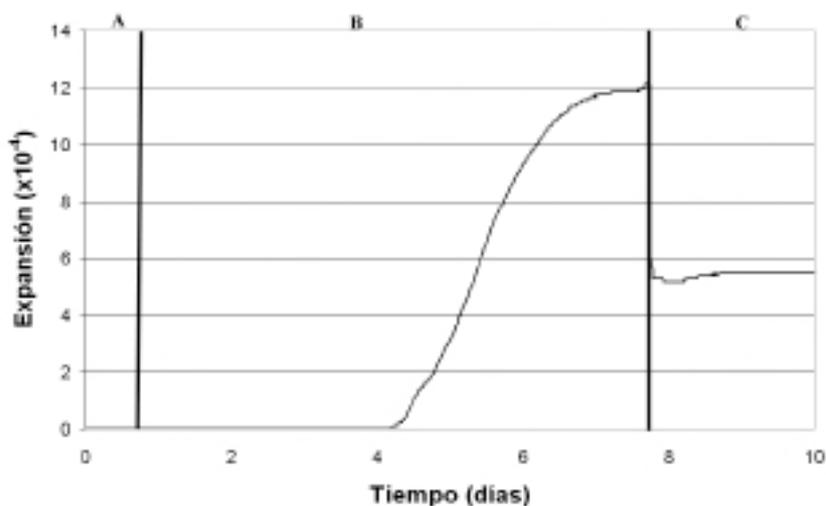


Figura VII-18: Gráfica de expansión de una probeta de caliza Campanil 8-Tu. Cada uno de los ciclos se puede dividir en 3 etapas. En la primera etapa (A) la probeta sometida a un registro continuo de su longitud se sumerge en una solución de 50 gr/l de sulfato magnésico, en la segunda etapa (B) tiene lugar el secado del material y, finalmente, en la tercera etapa (C) tiene lugar su rehidratación.

El cambio final de longitud es consecuencia de la progresiva microfracturación por la presión ejercida por las sales durante su cristalización. La repetición de los ciclos de humectación y secado crea una fatiga que se transmite a la fábrica de la roca desencadenando la fisuración del material.

La expansión media que hemos calculado para 8-Tu es de 4 mm/m. No existen datos de expansión absoluta en sistemas contaminados por sales en la bibliografía, pero sí existen datos de expansiones hídricas. Poschlod (1990) calculó una expansión máxima en el mármol de Carrara de 0,1 mm/m, Grimm (1999) calculó una expansión máxima de 1 mm/m en areniscas ricas en arcillas y Snethlage and Wendler (1997) calcularon expansiones máximas en areniscas de 0,5 a 5 mm/m.

Las tensiones internas que se originan durante estos ciclos pueden ocasionar daños en el material si los esfuerzos que se originan son superiores a su resistencia a tracción.

Jiménez *et al.*, (2002) desarrollaron un modelo para el cálculo del esfuerzo generado por los procesos expansivos en el interior de los materiales pétreos. La ecuación que proponen es la siguiente:

$$\sigma = E\alpha / 1-\nu$$

donde σ es el esfuerzo generado por la expansión del material, ν es el coeficiente de Poisson, α es la expansión del material ($\Delta l/l$) y E es el modulo de Young.

A partir de esta ecuación se ha calculado el valor teórico del esfuerzo generado en el interior de las rocas por la expansión del material. El valor calculado del esfuerzo de tracción provocado por la expansión en la roca es de 19,33 MPa en 8-Tu y de 7,67 MPa en 9-Fr, mientras que el valor de resistencia a tracción calculado por el ensayo brasileño es de 7,08 MPa en 8-Tu y de 11,98 en 9-Fr. El esfuerzo que origina la expansión en la roca 8-Tu es netamente superior a la resistencia a tracción del material y por lo tanto es responsable de la fractura y caída de fragmentos. El valor del esfuerzo

que origina la expansión en la roca 9-Fr es inferior a la resistencia mecánica a tracción del material y por lo tanto no es previsible la fractura del material por este proceso.

El esfuerzo generado durante la expansión en la roca 8-Tu es similar a la presión calculada por Pusch (1995) que indicó esfuerzos máximos de hasta 20 MPa, para la hidratación de esmectitas en areniscas.

Parece probable que uno de los factores determinantes del desarrollo de esta patología en la caliza campanil 8-Tu sea su sistema poroso que se caracteriza por presentar una elevada porosidad abierta 22,02 % que permite una intensa cristalización de sales en su interior y una distribución de la práctica totalidad de sus tamaños de acceso de poro (98,91%) en el rango 0,1-1 μm . Los materiales porosos que tienen una distribución de sus tamaños de acceso de poro en un pequeño rango de poro son los más susceptibles a los procesos expansivos (Ruedrich, 2006).

La roca 9-Fr a pesar de ser una caliza del Páramo con una edad, una composición química y mineralógica y unas microfacies semejantes a la roca 8-Tu, muestra unos valores de porosidad abierta y de distribución de sus tamaños de acceso de poro sensiblemente diferentes a los de la roca 8-Tu. La porosidad abierta en esta roca es de 15,2% y presenta un porcentaje de tamaños de acceso de poro del 79,1% en el rango 0,1-1 μm , 18,61% en el rango 1-10 μm y un porcentaje del 2,3% de tamaños de acceso mayores a 10 μm .

No obstante, el fenómeno de la expansión en 8-Tu tiene una variabilidad importante (coeficiente de variación 0,31) en grupos de muestras en las que para el ensayo de absorción presentan un coeficiente de variación de 0,02. Este bajo coeficiente de variación para el ensayo de absorción indica un sistema poroso muy homogéneo y hace poco factible la exclusiva atribución de la expansión al sistema poroso. Los demás factores que intervienen en la expansión de este material no se han establecido con certeza y es necesario continuar con la investigación del fenómeno. La hipótesis que mejor encaja es la presencia de materia orgánica, ya que permite explicar muchos de los fenómenos asociados que de no barajarla quedarían sin explicación.

Los compuestos orgánicos, especialmente las alginitas (recordemos aquí que se trata de calizas con carofitas), son capaces de "orientar" los cristales de sal, esto explicaría el fenómeno de la expansión durante el secado al crecer todos los cristales en la misma dirección. Por otra parte, la gelificación por puente catiónico es un fenómeno que hace razonable la mayor expansión hídrica con soluciones salinas al hinchar, por hidratación, el gel orgánico. Adicionalmente, la compleja degradación de la materia orgánica y su distribución irregular en la roca explicarían el elevado coeficiente de variación en los ensayos de expansión respecto del coeficiente de variación en el ensayo de absorción. Por otra parte, el elevado contenido en Na_2O y K_2O (Figura VI-3) sin equivalentes de Al_2O_3 y SiO_2 podrían demostrar la presencia de alginitas.

VII.2.2.3.2.- Expansión volumétrica.

Hasta ahora las principales metodologías existentes para cuantificar la expansión en materiales pétreos se fundamentaban en la obtención de datos puntuales mediante la utilización de diferentes comparadores. La utilización del Object Scan 3D permite obtener un modelo tridimensional de la evolución de la expansión en el material.

Los resultados del ensayo de expansión obtenidos por el Object Scan son de gran precisión e interés, ya que permiten obtener la variación en volumen que alcanza el material.

VII.2.2.3.2.- Discusión y resultados.

En la tabla VII-13 se presentan los resultados del ensayo de expansión volumétrica para la roca 8-Tu en los que se indica la variación en volumen después de cada ciclo de cristalización de sales. La duración de cada uno de estos ciclos ha sido de 7 días y han consistido en la inmersión de las probetas durante 6 horas en una solución de sulfato de magnesio al 5% y su posterior secado en una cámara climática bajo unas condiciones constantes de 36 °C y 15% de humedad relativa. La roca 9-Fr no ha presentado expansiones importantes con valores máximos de 0,04%.

Tabla VII-13: Valores de variación en volumen en la roca 8-Tu expresados en porcentaje respecto del volumen inicial.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Ciclo 1	-0,02	-0,13	-0,14
Ciclo 2	0,11	-0,03	0,035
Ciclo 3	0,27	0,44	0,10

A la finalización del ensayo las tres probetas de caliza campanil 8-Tu presentan un aumento en su volumen respecto al material inalterado que oscila entre el 0,10 y el 0,44%. Es de reseñar que tras el primer ciclo de secado ha tenido lugar en las tres probetas una ligera contracción del material.

En la figura VII-19 se muestra un ejemplo del cubo tridimensional que se ha construido a partir de las imágenes obtenidas por el Object Scan y a partir del cual se han obtenido las variaciones volumétricas mediante el programa Myriad 3D. El error calculado para esta técnica, repitiendo el proceso en un mismo estadio para una misma probeta, es inferior al 0,005%.

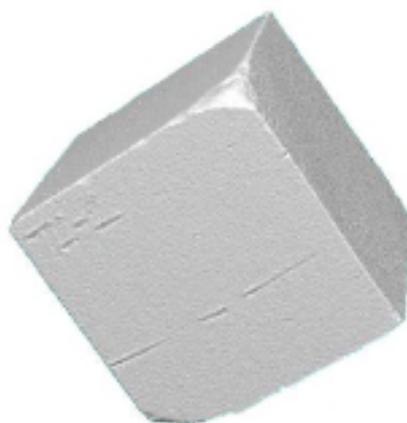


Figura VII-19: Figura en 3D de la probeta Tu-1 en el ciclo 0.

VII.2.2.3.3.- Anisotropía de Susceptibilidad Magnética.

La caracterización de la expansión en estas rocas se ha completado con un estudio de la fábrica magnética (que en rocas sedimentarias es el resultado de los procesos deposicionales y postdeposicionales) a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM). El objetivo de este estudio es determinar si existen variaciones en la configuración mineral de la roca al someterla a procesos de saturación total y secado extremo en presencia de agua y soluciones de sulfato de magnesio.

VII.2.2.3.3.- Discusión y resultados.

La susceptibilidad magnética (K_m) supone el valor promedio de susceptibilidad para cada material y es debida a la contribución de todos los componentes diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos presentes en la roca. Los valores bajos, e incluso negativos, obtenidos para el parámetro K_m (tabla VII-14) indican que la mineralogía magnética presente en ambas rocas es de tipo diamagnético. En la figura VII-20 se ha representado la susceptibilidad media frente al grado de anisotropía magnética para cada uno de los tres estadios, obteniendo una distribución característica de minerales con comportamiento diamagnético (Hrouda, 1986).

Tabla VII-14: Valores de los diferentes coeficientes calculados a partir de la ASM. N- número de especímenes, K_m - susceptibilidad media de cada espécimen, T- forma de los elipsoides magnéticos y P' - grado de anisotropía magnética.

8-Tu	N	K_m ($\times 10^{-6}$ SI units)	P'	T
Estadio 1	9	-0,28	1,187	-0,042
Estadio 2	9	7,69	1,030	0,252
Estadio 3	9	8,74	1,042	0,151

9-Fr	N	K_m ($\times 10^{-6}$ SI Units)	P'	T
Estadio 1	12	-3,71	1,021	0,009
Estadio 2	12	0,5,8	1,165	0,119
Estadio 3	12	6,11	1,056	0,237

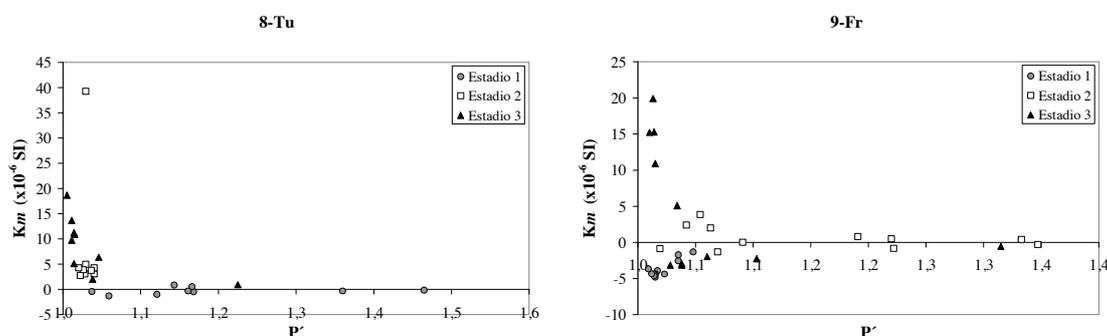


Figura VII-20: Relación entre K_m y P' para cada roca en los tres estadios diferentes.

El estudio de la fábrica magnética incluye tanto la caracterización de la forma como el análisis de la orientación de los elipsoides magnéticos. Estos parámetros se han caracterizado en cada uno de los estadios del ensayo.

Estadio 1. Medida inicial tras el secado de las probetas.

Estadio 2. Medida tras el secado de las probetas después de haber estado 15 días sumergidas en agua destilada.

Estadio 3. Medida tras el secado de las probetas después de haber estado 15 días sumergidas en una solución de sulfato de magnesio al 5%.

La forma de los elipsoides magnéticos se ha caracterizado mediante diagramas de anisotropía, en los cuales se relaciona la forma T y el grado de anisotropía P' (figura VII-21).

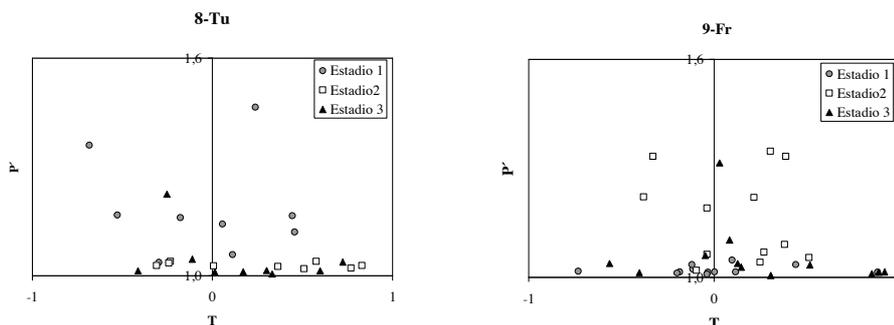


Figura VII-21: Diagramas de anisotropía para cada roca correspondientes a los tres estadios.

El análisis de la orientación de los ejes principales de susceptibilidad magnética ha sido caracterizado mediante proyección estereográfica equiareal de los ejes de susceptibilidad mínima, intermedia y máxima (figura VII-22). Geométricamente la susceptibilidad magnética puede expresarse como un elipsoide de tres ejes (K1, K2 y K3) que representan las direcciones de susceptibilidad máxima, intermedia y mínima respectivamente. Para elipsoides oblatos $K1, K2 > K3$ y para elipsoides prolatos $K1 > K2, K3$.

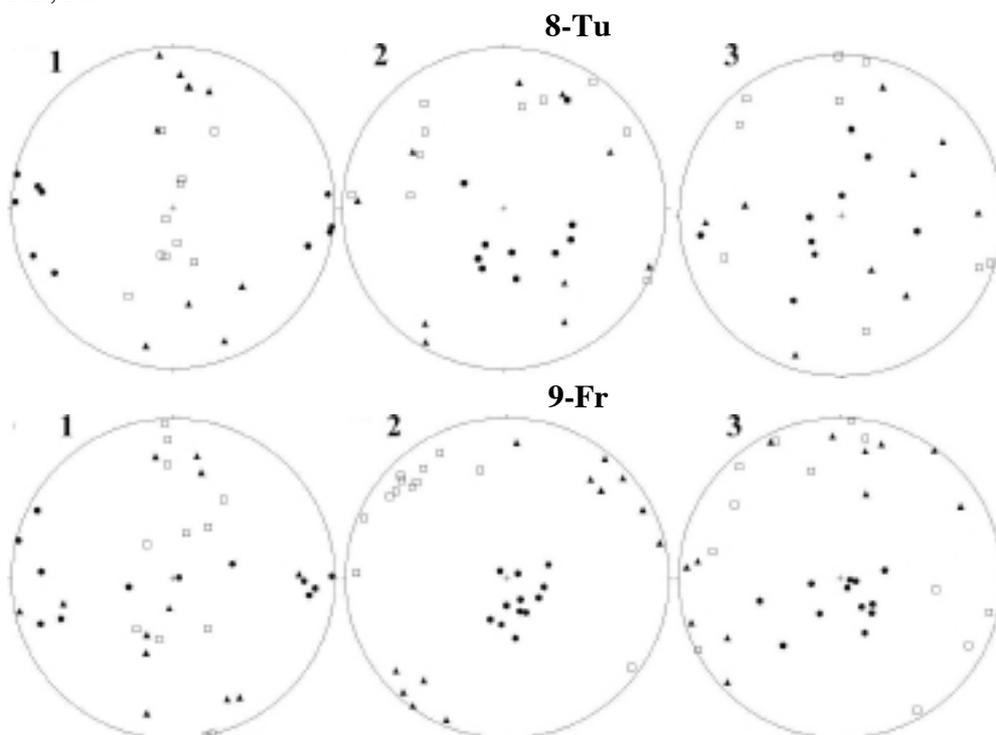


Figura VII-22: Estereogramas en los que se representan los ejes magnéticos de susceptibilidad mínima (círculos), intermedia (triángulos) y máxima (cuadrados).

En la roca 8-Tu en el estadio 1, la forma del elipsoide magnético es triaxial y presenta una clara foliación magnética con dispersión de los ejes K1-K2 y buena concentración de K3 perpendicular a la laminación sedimentaria. En los estadios 2 y 3 al saturar las probetas con agua destilada y con la solución salina, se produce la pérdida de la fábrica original (tabla VII-15) y el elipsoide magnético tiende a hacerse oblatos $1 > T > 0$ y disminuye la anisotropía pasando a presentar una fábrica isotrópica.

La roca 9-Fr se caracteriza por presentar una geometría triaxial en el elipsoide magnético $0.5 > T > -0.5$ en los tres estadios. En el estadio 1, la roca muestra una fábrica relativamente isótropa (tabla VII-15). Sin embargo, en los estadios 2 y 3 los estereogramas muestran una clara fábrica anisótropa, con lineación magnética (orientación preferente de la mineralogía magnética) paralela a la laminación sedimentaria (figura VII-22).

Tabla VII-15: Fábrica magnética del material en cada uno de los estadios.

Datos magnéticos	Fábrica magnética Estadio 1	Fábrica magnética Estadio 2	Fábrica magnética Estadio 3
8-Tu	ANISÓTROPA	ISÓTROPA	ISÓTROPA
9-Fr	ISÓTROPA	ANISÓTROPA	ISÓTROPA

VII.3.- CONCLUSIONES.

VII.3.1.- Ensayo de cristalización de sales normalizado.

-Las variaciones en los ensayos físicos entre la roca fresca y el material alterado permiten determinar, no sólo el grado de alteración del material, sino también su durabilidad. El comportamiento durante los procesos de alteración depende principalmente del sistema poroso del material, de su composición mineralógica y de su fábrica, así como del tipo de sal utilizada.

-Los resultados obtenidos para el ensayo de cristalización de sales indican que la dolomía de Blancas 31-B12 y las arenitas miocenas 6-Un, 7-Ay y 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%.

-A pesar que las tres arenitas miocenas tienen una composición química y mineralógica y unas facies semejantes, muestran un comportamiento netamente diferente frente al ensayo de cristalización de sales. Los resultados obtenidos en la caracterización del sistema poroso 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. Esta facilidad de circulación de fluidos en su interior puede favorecer los procesos de degradación por cristalización de sales solubles. La configuración del sistema poroso en la arenita 10-Az es la principal característica de este material que le hace poseer una mayor durabilidad frente a las arenitas 6-Un y 7-Ay. La arenita 10-Az exhibe la menor retención de agua tras secado y el menor contenido en agua crítico de las tres arenitas, así como un mayor porcentaje de macroporosidad y un mayor tamaño medio de acceso de poro.

-La porosidad ha sufrido importantes variaciones a pesar de la escasa pérdida en peso que tienen la mayoría de las rocas una vez finalizado el ensayo de cristalización de sales. La roca 12-Ca presenta aumentos superiores al 30%, 8-Tu, 9-Fr, 29-A, 30-D y 31-B12 muestran aumentos comprendidos entre el 10 y el 30%, 18-VI-II, 28-Crt, 31-B11 y 31-B13 muestran un aumento en su porosidad inferior al 10% y, finalmente, 16-VI-I, 27-Tr, 13-Pu, 17-CFI y 17-CFS presentan una ligera disminución en la porosidad abierta tras la cristalización de sales como consecuencia de la obturación de parte de su sistema poroso por las sales cristalizadas.

-El ensayo de cristalización de sales ha provocado aumentos importantes en el coeficiente de absorción capilar en la práctica totalidad de las rocas caracterizadas y, por lo tanto, variaciones en la cinética de los procesos de transmisión de fluidos.

VII.3.2.- Ensayo de cristalización de sales no normalizado.

VII.3.2.1.- Permeabilidad.

-La caracterización de la variación espacial de la permeabilidad entre el material inalterado y el material alterado ha permitido evaluar la alteración en los estadios iniciales del deterioro y usar esta técnica como indicador de la alterabilidad potencial.

-Esta técnica permite identificar los elementos texturales y estructurales con una mayor alterabilidad potencial en los materiales pétreos y correlacionar la alteración y el movimiento de sales durante el secado con las modificaciones del sistema poroso.

-En rocas diferentes una misma concentración de sal no genera los mismos deterioros, ya que el proceso depende de la textura y mineralogía del material pétreo. Para que se produzca deterioro por acción de la cristalización de sales es necesario que la fatiga generada durante su cristalización supere la resistencia de la fábrica del material.

-Las variaciones existentes entre los valores de permeabilidad de la roca fresca y de la roca alterada tras los procesos de cristalización de sales son resultado de la modificación del sistema poroso del material pétreo. Este método es el más detallado que existe para evaluar las modificaciones que la cristalización de sales produce en el sistema poroso de los materiales pétreos y permite predecir cual será el comportamiento del material tras su puesta en obra.

-La variabilidad espacial de la permeabilidad permite discernir zonas de alta y de baja permeabilidad. Las áreas identificadas de alta permeabilidad serán zonas potenciales de entrada de agua y soluciones salinas. La distribución espacial de las áreas de alta y baja permeabilidad están determinadas por las estructuras primarias de las rocas y por los diferentes procesos diagenéticos que han tenido lugar en las mismas.

-Las características texturales y estructurales de las rocas que les confieren una mayor alterabilidad son: zonas bioturbadas (9-Fr, 13-Pu, 31-B11 y 31-B12), recristalizaciones de la matriz a microesparita y pseudoesparita (9-Fr, 13-Pu, 16-VI-I, 28-Crt y 31-B13), discontinuidades como las juntas estilolíticas (29-A), orientaciones preferentes de componentes de la roca (8-Tu) y parches esparíticos (31-B12 y 28-Crt). En una misma probeta, estas características texturales y estructurales se verán más o menos alterados en función de su posición relativa, ya que el movimiento de las sales está ampliamente influenciado por el régimen de secado. En este ensayo todas las probetas han sido sometidas a un secado lento y prolongado. Este tipo de secado produce una acumulación de sales en superficie y zonas subsuperficiales.

-El régimen de secado ha afectado principalmente a las biomicritas con porosidad superior al 10% (8-Tu y 9-Fr) cuando la solución salina utilizada era el sulfato magnésico, provocando que los valores más elevados de permeabilidad se localicen en la mitad superior de la probeta. Los resultados de los ensayos hídricos para estas rocas indican que presentan un sistema poroso homogéneo bien comunicado con accesos de gran tamaño y con un secado muy eficaz. El bajo contenido de agua crítico indica una velocidad de secado media-alta.

-Las zonas de las rocas que presentan tras la cristalización de sales unos valores mas altos de permeabilidad son aquellas zonas en las que tiene lugar preferentemente la cristalización de sales y son, por lo tanto, los puntos con una mayor alterabilidad potencial.

-Las rocas 9-Fr, 12-Ca, 16-VI-I, 29-A, 30-D, 31-B11 y 31-B12 muestran un mismo comportamiento tras la cristalización de sales, independientemente del tipo de sal utilizado en el ensayo.

-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%: 12-Ca, 13-Pu y 28-Crt), a no ser que tengan algún tipo de discontinuidad abierta que permita la entrada preferente de la disolución salina (biomicritas con porosidad inferior al 3%: 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), por contra, 29-A presenta un importante aumento en la permeabilidad tras los ciclos de cristalización de sales. Petrográficamente, esta caliza se diferencia de las otras biomicritas por presentar abundantes discontinuidades. Estas discontinuidades son zonas preferentes de acumulación y cristalización de sales. En esta roca el proceso predominante es la cristalización de sales y génesis de nuevos 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.

-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 primeros estadios del ensayo de cristalización de sales (biomicritas con porosidad superior al 10% y rocas recristalizadas tanto calcínicas como dolomíticas). La única excepción es la roca 31-B13 tras la cristalización de sulfato de magnesio. En estas rocas el proceso predominante es la cristalización de sales y génesis de nuevos 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.

-El ensayo de permeabilidad permite completar la caracterización tecnológica de las rocas y contribuir a una correcta adecuación de uso como material de aplicación constructiva en función de sus características y de los parámetros ambientales de las zonas en las que van a ser utilizados. Dado que las sales son unos de los principales agentes de deterioro en elementos de patrimonio, el conocer tanto las modificaciones que generan en el sistema poroso, como su distribución, es fundamental para evaluar la durabilidad de los materiales tras su puesta en obra y poder realizar una correcta restauración-rehabilitación de nuestro patrimonio.

VII.3.2.2.- Variaciones morfológicas.

-La caliza Campanil 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 piedra en paramentos pétreos en tiempos muy cortos.

-La caliza campanil de Fraga, desde el punto de vista geológico, es una caliza del Páramo con una edad y unas microfacies semejantes a las de Tudela. Sin embargo, este material, a diferencia de la caliza campanil de Tudela, no presenta problemas por expansión durante el secado en presencia de sales de magnesio por lo que es un material apto tanto para su uso en obra civil moderna, como material de sustitución en restauración.

-La presión que ejerce el sulfato de magnesio al cristalizar en el interior de la roca 8-Tu crea un esfuerzo que es suficiente para causar su fragmentación, mientras que el esfuerzo originado en 9-Fr por la cristalización de sales es inferior a la resistencia a tracción del material.

-La expansión irreversible se va incrementando progresivamente con los sucesivos ciclos de humectación secado, llegando a alcanzar una expansión irreversible máxima de $59,74 \times 10^{-4}$ en la caliza campanil 8-Tu y de $23,82 \times 10^{-4}$ en la caliza campanil 9-Fr.

-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.

-Del análisis direccional y de la forma de los elipsoides magnéticos se extrapola la existencia de cambios texturales en el interior del material estudiado.

-En la caliza campanil de Tudela se produce un cambio en la fábrica magnética original tras la saturación del material pasando de anisótropa en el estadio 1 a isótropa en los estadios 2 y 3. Esta variación en la anisotropía tras la saturación con agua y con la solución salina indica una desorganización y, por lo tanto, la pérdida de la anisotropía manifestada por aquellos minerales que muestran señal frente a la susceptibilidad magnética.

-En la caliza campanil de Fraga se produce un cambio en la fábrica magnética con aumento de la anisotropía del material tras la saturación del mismo con agua destilada y con la solución salina, mostrando una clara alineación magnética por la orientación preferente de sus constituyentes que realza la laminación sedimentaria original del material. Sin embargo y tras la saturación con la solución salina, la lineación magnética se presenta menos marcada que en el estadio 2 por la desorganización inducida por la cristalización de las sales de magnesio. Esta lineación magnética está asociada a procesos mecánicos por alineaciones de la mineralogía diamagnética.

CAPÍTULO VIII.- EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

CAPÍTULO VIII.- EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

VIII.1.- Introducción.

En esta parte de la investigación se ha evaluado la efectividad de tres productos comerciales de protección y restauración de la Piedra Natural con el objeto de evaluar su papel protector en la roca frente a las soluciones salinas, que son sin duda, los agentes de deterioro más intensos y frecuentes en la zona geográfica donde estos materiales son especialmente utilizados.

Dentro de las 18 rocas sobre las que se ha realizado la caracterización petrofísica detallada, se ha evaluado la acción de estos productos en aquellas rocas que tras la realización del ensayo de cristalización de sales presentaban una pérdida en peso superior al 3%. El estudio se ha realizado en la roca carbonatada 31-B12 y en las arenitas miocenas 6-Un, 7-Ay y 10-Az.

La elección tanto de un consolidante como de su sistema de aplicación necesita de una serie de ensayos de laboratorio normalizados que determinarán las variaciones petrofísicas de la piedra tratada respecto a la piedra sin tratar (Navarro, 2005). Estos ensayos permiten identificar los productos que mejor se ajustan a las características del material (Buj *et al.*, 2006).

La función de un consolidante es la de aumentar la cohesión y adhesión (mediante la precipitación de nuevas fases) de los diferentes constituyentes de la roca entre la zona externa alterada y el sustrato interno sin alterar, así como generar un aumento de las características mecánicas (pero siempre sin superar las de la roca sana) y provocar una disminución de la porosidad y de la permeabilidad al vapor. Estos son requisitos para que el tratamiento de consolidación se traduzca en un aumento de la durabilidad del material, mediante la modificación de sus propiedades y de su estructura interna.

La aplicación de estos tratamientos no debe generar subproductos agresivos para la roca como sales solubles. Los productos son aplicados sobre la superficie de las muestras en estado líquido y deben penetrar en el interior del material sin crear un límite neto entre el material consolidado y material sin consolidar distribuyéndose por el sistema poroso. En caso contrario, se generará una interfase entre la zona tratada y sin tratar con diferentes propiedades físicas y mecánicas. Por ello, se considera que un tratamiento resulta más eficaz cuanto mayor sea su penetración (Gutt, 1973; Torraca, 1975). La acumulación del consolidante en la capa más externa del material provocará una circulación de fluidos más tortuosa que conllevará el desprendimiento de las láminas externas consolidadas.

Las principales características que debe presentar un consolidante son (IPHE 2003):

-Deben producir una mejora efectiva de las propiedades mecánicas del material tratado con respecto al material sin tratar.

-El producto debe penetrar en profundidad. Este factor está relacionado con su viscosidad.

-Las modificaciones producidas en el sistema poroso de la roca garantizarán la continuidad, aunque reducida, de la transferencia de humedad hacia el exterior.

-No deben generar películas o depósitos superficiales. Dichas películas son consecuencia de una deficiente penetración derivada del exceso de viscosidad de los productos utilizados o, en el polo opuesto, del arrastre hacia la superficie que producen los disolventes durante su evaporación.

-La distribución del producto debe ser uniforme.

-Se producirá una disminución en la alterabilidad de la roca tratada frente a la roca sin tratar, puesta de manifiesto mediante una mejora en la respuesta de la roca ante los ensayos de alteración acelerada.

-El producto aplicado debe ser compatible con la piedra, tanto desde el punto de vista físico (con objeto de evitar tensiones derivadas de diferentes coeficientes dilatométricos, etc.) como químico, evitándose aquellos productos que puedan interactuar con ella.

-El proceso de consolidación no debe generar subproductos indeseables.

-Ausencia de alteraciones cromáticas importantes (siempre existe cambio cromático).

-Reversibilidad del tratamiento, condición difícil de cumplir una vez que el producto aplicado haya fraguado o polimerizado en el interior de la piedra.

-Otras: Fácil manipulación, ausencia de toxicidad, período de caducidad, condiciones de almacenamiento, etc.

Los ensayos realizados para evaluar la eficacia de los tratamientos se han dividido en tres grupos: ensayos físicos (absorción libre de agua, succión capilar y colorimetría), mecánicos (dureza superficial Shore-D) y de alterabilidad (ensayo de envejecimiento artificial acelerado de cristalización de sales). Se han ensayado tandas de 3 probetas por tipo de roca, producto y método de aplicación. En todos los casos, y para valorar las variaciones de las propiedades físicas y mecánicas, los ensayos se han realizado sobre las mismas probetas antes y después de la consolidación del material y tras el ensayo de cristalización de sales. El estudio se ha completado evaluando el grado de penetración alcanzado por cada uno de los tratamientos mediante microscopía electrónica de barrido.

VIII.2.- Tratamientos seleccionados.

Los productos utilizados en la presente investigación se han seleccionado teniendo en cuenta su uso tanto en el campo de las rocas industriales, como en el campo de la conservación y restauración del Patrimonio histórico-artístico. Como criterios para seleccionar el producto se han considerado las características petrológicas de las rocas, el "valor consolidante intrínseco del producto" en base a las propiedades ya expuestas, los principales agentes de alteración a los que se verá sometido el material tras su puesta en obra, así como la "facilidad de uso" teniendo en cuenta los requisitos necesarios para su aplicación.

Los productos ensayados han sido dos consolidantes inorgánicos: los silicatos alcalinos de litio y de potasio, y un consolidante orgánico: el Paraloid B-72.

Los consolidantes inorgánicos seleccionados se caracterizan por presentar una gran afinidad con el soporte pétreo, respetar la estructura reticular, mantener las propiedades físicas originales y ser los que mejor resisten a la intemperie. En contra, tienen como principales inconvenientes su baja penetración, posibilidad de génesis de productos secundarios como sales solubles y su mayor rigidez.

El silicato de potasio, nombre comercial Betolin P 35 E, ha sido suministrado por Industrias Químicas del Ebro con un 30% de sólidos en solución industrial de 300 gr/kg y densidad 1,25 gr/cm³. Este producto se ha aplicado directamente con esta concentración.

El uso del silicato de potasio como consolidante data del siglo XIX, su principal problema consiste en la génesis de hidróxidos alcalinos durante la hidrólisis que generan sales solubles que provocan una aceleración en el proceso de alteración. Por este motivo, se dejó de emplear en trabajos de conservación de Patrimonio histórico-artístico en los años 1970-1980 (Arnold and Zenhder, 1990). En cambio, este producto es ampliamente utilizado en el campo de las rocas industriales por su alto poder consolidante y bajo coste.

El silicato de litio, nombre comercial Bersil Li 20, ha sido suministrado por Industrias Químicas del Ebro con un 26% de sólidos y densidad 1,25 gr/cm³. Se ha aplicado diluido al 50% en agua destilada con una densidad de 1,10 gr/cm³ siguiendo las recomendaciones de uso de Mateos (2004).

El silicato de litio es un nuevo producto dentro de los silicatos alcalinos que ha nacido en las últimas décadas, entre el siglo XX y XXI, con pretensión tanto de uso industrial como en restauración. Este producto presenta como ventaja respecto al silicato de potasio la elevada estabilidad de las sales de litio que se generan como subproductos.

Estos consolidantes inorgánicos seleccionados actúan precipitando un compuesto inorgánico, gel de sílice, como consecuencia de la hidrólisis del silicato en el interior del sistema poroso. Este gel realiza la función de aglomerante generando un aumento de la cohesión interna.

El consolidante orgánico seleccionado es el Paraloid B-72, es una resina acrílica perteneciente a la familia de las resinas termoplásticas. Existe una amplia experiencia en restauración en el uso de este producto, ya que viene usándose desde finales del siglo XIX. De los consolidantes "modernos" es prácticamente el mejor evaluado.

El Paraloid B-72 es un copolímero de metacrilato de etilo y acrilato de metilo. Se caracteriza por tener una baja viscosidad, bajo peso molecular y una naturaleza diferente a la de los minerales que forman la roca. Para su uso como consolidante se aplica diluido al 5% en acetona, en esta concentración produce pequeñas disminuciones de la permeabilidad al vapor, cualidad importante en la consolidación. El ácido acrílico al combinarse con alcoholes genera monómeros acrílicos que polimerizan en el interior de la roca dando lugar a polimetilmetacrilato. Este tipo de consolidantes actúa formando una película en la red capilar por evaporación del disolvente con gran capacidad adhesiva. Esta fina capa recubre la superficie del sistema poroso provocando la unión de los componentes del material.

Los principales inconvenientes que presenta este producto son: expuesto a la radiación ultravioleta cambia de color y presenta propiedades físico-químicas diferentes a la de los minerales que forman la roca. Este producto presenta propiedades muy diversas en función del tipo de disolvente y de su concentración.

VIII.3.- Sistemas de aplicación.

El éxito de un tratamiento de conservación depende, además del producto y de las características intrínsecas del material, de su sistema de aplicación, tipo de disolvente utilizado y tiempo de contacto entre el consolidante y el sustrato pétreo (Accardo *et al.*, 1981). Se han evaluado dos mecanismos de aplicación para cada uno de los tres productos seleccionados. Previamente a la aplicación de los productos, se limpió la superficie de las probetas con el objetivo de conseguir una buena penetración del consolidante.

Los consolidantes se han aplicado sobre probetas cúbicas de 5x5x5 cm mediante dos sistemas de aplicación diferentes:

Método 1) Aplicación con brocha hasta saturación.

La aplicación por brocha en laboratorio se ha realizado intentando extrapolar las mismas condiciones que existirían si el material estuviera colocado en obra. Para ello, y siguiendo las recomendaciones de la COMISION 25-PEM Rilem, los productos se han aplicado sobre las 4 caras verticales de las probetas con tal orientación que se han impregnado 2 caras perpendiculares a la estratificación y 2 paralelas, dejando 2 caras sin impregnar. La aplicación se ha realizado hasta la saturación de la cara consolidada, repitiéndose tres veces la misma operación con un intervalo de 1 hora entre cada una de ellas.

Este método presenta un tiempo de contacto del producto con el material reducido, por lo que la penetración será menor que en la aplicación por inmersión. Para conseguir una mejor penetración del consolidante, previamente a su aplicación, se vaporizaron las probetas con disolvente puro para crear una diferencia de concentración entre la superficie y el interior de la probeta y forzar la penetración del producto por el mecanismo de difusión osmótica a través de la red capilar. Tras la aplicación del consolidante se limpió con disolvente la superficie tratada para evitar posibles alteraciones cromáticas.

Método 2) Inmersión completa a presión y temperatura ambiente.

La aplicación de los productos por inmersión a presión atmosférica consigue una mayor penetración al aumentar tanto la superficie como el tiempo de contacto. La consolidación de las probetas se ha realizado sumergiéndolas en consolidante durante 6 horas.

Además de controlar las condiciones ambientales durante la aplicación de los productos sobre los materiales pétreos es también muy importante evitar durante el secado la evaporación del disolvente, ya que implicaría una migración del consolidante hacia la superficie de la roca lo que podría generar una capa superficial endurecida sobre un sustrato sin cohesión. Para evitarlo, las probetas tratadas con Paraloid han sido cubiertas por medio de un film. El resto de probetas tratadas con los otros 2 productos se han dejado secar al aire bajo unas condiciones ambientales estables.

VIII.4.- Evaluación de la penetración de consolidantes.

El grado de penetración alcanzado por los productos depende fundamentalmente de la red porosa del material (número, tamaño, forma y grado de conectividad de los espacios vacíos (Díaz-Pache, 1994)), de la viscosidad del consolidante y de la forma de aplicación. Dada la elevada porosidad de estas rocas y su alto grado de conectividad puesta de manifiesto en los ensayos hídricos, era de esperar una buena penetración de los productos.

La profundidad de penetración de los consolidantes y su distribución en el sistema poroso del material pétreo se ha determinado mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) sobre muestras de un tamaño aproximado de 1x1x2 cm.

Los parámetros determinados han sido la profundidad alcanzada por el consolidante, morfologías de depósito, grado de homogeneidad que alcanzó en la consolidación y la eventual formación de películas superficiales.

VIII.4- Discusión y resultados.

El estudio al microscopio electrónico de barrido ha puesto de manifiesto que las tres arenitas caracterizadas (6-Un, 7-Ay y 10-Az) muestran para un mismo producto, las mismas características de penetración y distribución. Estas arenitas presentan para un mismo consolidante una mayor penetración que la roca 31-B12.

Silicato de potasio.

Las arenitas tratadas con silicato de potasio presentan en los 3 primeros milímetros una capa aparentemente continua de consolidante con un espesor que oscila entre las 5 y 10 μm . Esta capa aparece craquelada (figura VIII-1a) permitiendo la transferencia de humedad con el exterior y minimizando el efecto producido por la costra del consolidante. En los milímetros iniciales el producto afecta a un amplio rango de tamaños de poros, disminuyendo en profundidad el tamaño de los poros ocluidos y disminuyendo, por tanto, el tamaño medio relativo de poro, ya que los poros de mayor diámetro únicamente quedan parcialmente cerrados. A partir de los 5 mm, hay una disminución importante en la cantidad de producto que ha penetrado disponiéndose únicamente de una manera discontinua.

En la roca 31-B12 el producto genera una deposición bastante más incompleta que en las arenitas (figura VIII-1b). Se ha depositado rellenando profusamente los poros en forma de láminas de sílice, pero no alcanza ni la continuidad ni el espesor que presenta en las arenitas. En los poros de mayores dimensiones el consolidante se localiza en el contorno de los mismos. La cantidad del consolidante disminuye drásticamente a partir de los 2 mm desapareciendo a los 5 mm de profundidad.

La penetración de este producto no ha variado en función de su forma de aplicación, aunque tras la aplicación del producto por brocha el espesor de la capa de consolidante se ha reducido entre 2 y 5 μm .

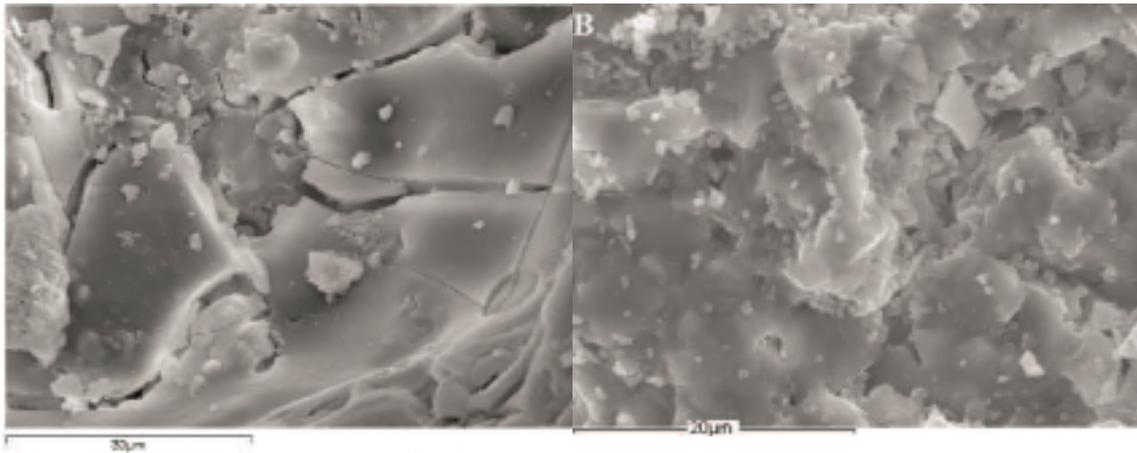


Figura VIII-1: A) Probeta de 10-Az consolidada con silicato de potasio aplicado por inmersión x1800. Detalle del craquelado característico que se ha producido en las acumulaciones superficiales del producto. B) Probeta de 31-B12 consolidada con silicato de potasio aplicado por inmersión x3000.

Silicato de litio.

La penetración de este producto, en estas rocas, varía en gran medida en función de su forma de aplicación. La penetración del producto aplicado por brocha ha sido baja, con una distribución superficial del producto según parches irregulares. Tras la aplicación del producto por inmersión su distribución es más uniforme y aumenta la cantidad de producto dando lugar a acumulaciones de mayores espesores en los 2 mm superficiales en las arenitas (figura VIII-2a) y en el primer milímetro superficial en la roca 31-B12 (figura VIII-2b). La cantidad de producto disminuye rápidamente en profundidad, desapareciendo a partir de 6 mm en las arenitas y a partir de 3 mm en 31-B12.

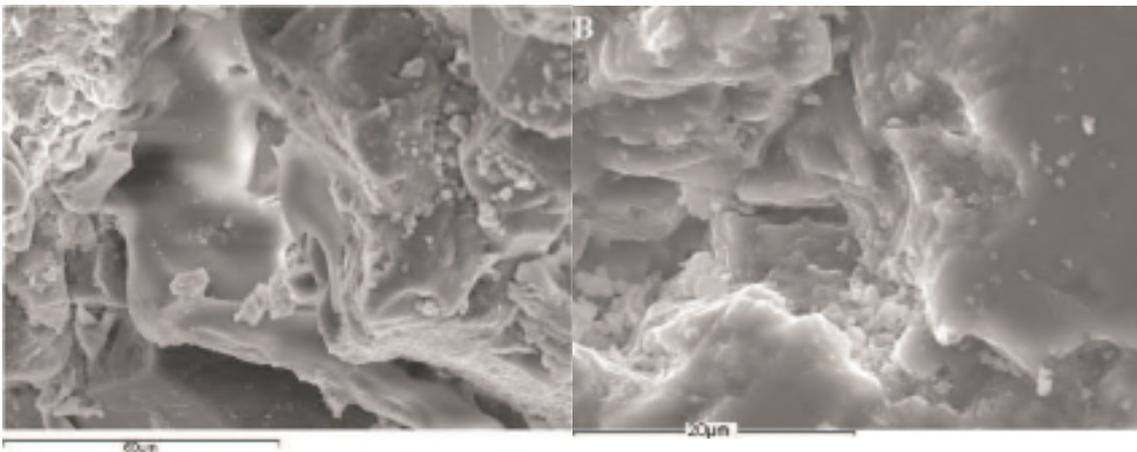


Figura VIII-2: A) Probeta de 6-Un consolidada con silicato de litio aplicado por inmersión x1000. B) Probeta de 31-B12 consolidada con silicato de litio x3000. El producto precipitado es un gel de sílice amorfo microfisurado.

Paraloid B-72.

En estas rocas es difícil identificar este producto ya que la deposición se ha producido de forma dispersa, con carácter filmógeno y prácticamente no ha penetrado en el interior del material. Únicamente se ha reconocido el producto en los dos milímetros más superficiales. En la figura VIII-3 se muestran dos fotografías en las que se observa la escasa penetración del producto distribuido heterogéneamente tapizando los minerales y cerrando los poros de pequeño tamaño.

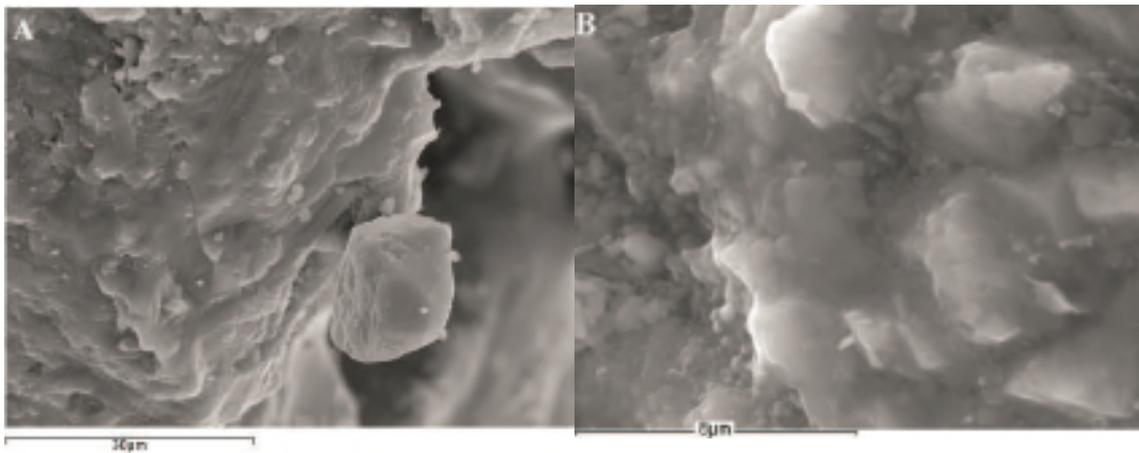


Figura VIII-3: A) Probeta de 10-Az consolidada con Paraloid B-72 x1800. Disposición heterogénea formando cuellos interparticulares sin producir la oclusión de la porosidad. B) Probeta de 31-B12 consolidada con Paraloid B-72 x7500.

VIII.5.- Variación de las propiedades físicas y mecánicas tras la aplicación de los consolidantes.

Para evaluar la efectividad de los tratamientos de consolidación se han determinado las modificaciones de algunas características intrínsecas del material a partir de diferentes ensayos físicos y mecánicos.

VIII.5.1.- Variación de las propiedades físicas tras la aplicación de los consolidantes.

Aunque la función principal de un consolidante es aumentar la cohesión del material, también tienen como objetivo un descenso en la porosidad, ya que constituye la vía de acceso de los principales agentes degradantes. Estos productos no deben ni ocluir totalmente la porosidad para permitir una óptima transferencia de vapor de agua en el material, ni generar cambios importantes en el color superficial de la piedra natural tras su aplicación.

Los ensayos físicos realizados antes y después de la consolidación de los materiales pétreos han sido: ensayo de absorción libre de agua, ensayo de absorción capilar, medida del color y ensayo de absorción y desorción automatizado.

VIII.5.1.1.- Absorción libre a presión atmosférica.

En función del tipo de consolidante y de su modo de aplicación han tenido lugar diferentes variaciones en la absorción y en la porosidad abierta de las rocas caracterizadas (tabla VIII-1). Todos los consolidantes han provocado un descenso en estos parámetros, pero si se compara las diferencias entre un mismo producto en función del método de aplicación, se observa que los consolidantes aplicados por el método de inmersión total han originado una reducción mayor en estos parámetros que la aplicación mediante brocha.

Tras la aplicación de los productos por inmersión el producto que ha provocado unas reducciones mayores en los valores tanto de absorción como de porosidad abierta ha sido el silicato de potasio con reducciones que oscilan entre el 21% y el 42%. El silicato de litio ha provocado una disminución en la absorción que oscila entre el 12% y el 17% y en la porosidad abierta entre el 13% y el 20%, siendo el Paraloid el producto que menos ha modificado las propiedades hídricas originales disminuyendo los valores de ambos parámetros entre un 2% y un 13%.

La aplicación de los productos por brocha no ha originado modificaciones tan importantes en las propiedades hídricas como las generadas tras su aplicación por inmersión. En la arenita 10-Az no se han producido reducciones importantes en la porosidad abierta y en la absorción con ninguno de los productos, siendo los valores máximos de reducción en la absorción de 1,85% tras la aplicación del silicato de litio. En cambio, si se han modificado los valores de absorción y porosidad abierta en el resto de las rocas caracterizadas, con una disminución en estos parámetros de hasta el 16% tras consolidar las rocas con los silicatos inorgánicos y hasta del 6,86% tras consolidar las rocas con Paraloid.

Tabla VIII-1: Variación en porcentaje del contenido en humedad (W) y de la porosidad abierta (P₀) tras la aplicación de los consolidantes respecto de los valores de la roca no tratada.

	Silicato potasio inmersión		Silicato potasio brocha		Silicato litio inmersión		Silicato litio brocha		Paraloid inmersión		Paraloid brocha	
	P ₀	W	P ₀	W	P ₀	W	P ₀	W	P ₀	W	P ₀	W
31-BI2	-21,93	-22,99	-10,77	-11,25	-16,44	-17,24	-7,56	-8,05	-13,54	-13,82	-0,31	-0,24
6-UN	-42,66	-38,28	-15,97	-4,51	-15,86	-12,58	-16,84	-3,94	-5,84	-3,02	-0,84	-0,78
7-AY	-38,43	-37,70	-11,87	-5,85	-20,19	-14,60	-13,92	-7,89	-6,03	-4,27	-6,86	-3,68
10-AZ	-40,35	-41,57	-1,02	-1,17	-13,24	-13,62	-0,43	-1,85	-2,52	-2,65	-0,73	-1,03

VIII.5.1.2.- Densidad aparente y densidad real.

Tras consolidar las rocas se han producido cambios en su densidad como respuesta a las modificaciones que tienen lugar en su sistema poroso por la sustitución de parte del aire que se localiza en los poros por productos consolidantes de mayor densidad (tabla VIII-2). Esta variación en la densidad tras la aplicación de los consolidantes en las arenitas consiste preferentemente en un aumento de la densidad aparente y en una disminución de la densidad real hídrica, lo que indica una disminución de la porosidad efectiva del material, mientras que en la roca 31-BI2 tiene lugar una disminución en los valores para ambas densidades.

En todas las rocas caracterizadas el mayor aumento de la densidad aparente y la mayor reducción en la densidad real lo han presentado las probetas tratadas con silicato de potasio aplicado por inmersión.

Tabla VIII-2: Variación en porcentaje en la densidad aparente (ρ_b) y en la densidad real hídrica (ρ_{rph}) tras la aplicación de los consolidantes respecto de los valores de la roca no tratada.

	Silicato potasio inmersión		Silicato potasio brocha		Silicato litio inmersión		Silicato litio brocha		Paraloid inmersión		Paraloid brocha	
	ρ_b	ρ_{rph}	ρ_b	ρ_{rph}	ρ_b	ρ_{rph}	ρ_b	ρ_{rph}	ρ_b	ρ_{rph}	ρ_b	ρ_{rph}
31-BI2	0,10	-1,97	-0,33	-1,17	-0,07	-1,43	-0,38	-1,49	-0,21	-1,70	-0,38	-0,55
6-UN	2,47	-2,95	0,51	-0,60	1,87	-0,74	-0,10	-1,08	0,82	-0,07	0,59	0,73
7-AY	2,40	-3,08	0,33	-0,57	1,08	-1,57	0,78	-1,17	0,78	0,15	0,18	0,15
10-AZ	2,33	-3,32	-1,76	-0,68	1,01	-1,08	0,86	0,00	1,67	0,53	-0,82	-0,07

VIII.5.1.3.- Absorción capilar.

La variación en el coeficiente de absorción capilar ha dependido tanto del material como del consolidante utilizado (tabla VIII-3). Los únicos aumentos en este coeficiente han correspondido a la roca 31-BI2 tras la aplicación de silicato de potasio por ambas técnicas y de silicato de litio por inmersión.

Las reducciones más importantes en el valor del coeficiente de absorción capilar han tenido lugar en todas las rocas tras la aplicación del Paraloid. Las reducciones en el coeficiente de absorción capilar tras la aplicación de este producto por brocha en las rocas 31-BI2 y en 6-Un ha sido de 43,51% y 86,85% respectivamente, mientras que en las rocas 7-Ay y 10-Az la reducción en el coeficiente de absorción capilar tras la aplicación del Paraloid por inmersión ha sido del 92,82%.

Tabla VIII-3: Variación en porcentaje respecto del valor inicial del coeficiente de absorción capilar tras aplicar los consolidantes.

	Silicato potasio inmersión	Silicato potasio brocha	Silicato litio inmersión	Silicato litio brocha	Paraloid inmersión	Paraloid brocha
31-B12	7,07	12,75	28,98	-14,68	-26,12	-43,51
6-UN	-68,79	-14,59	-37,89	-49,02	-64,41	-86,85
7-AY	-85,17	-18,04	-54,15	-56,99	-92,82	-49,64
10-AZ	-54,20	-20,67	-24,50	-18,37	-92,81	-83,99

En la figura VIII-4 se observa como se han modificado en gran medida las pendientes de las curvas de absorción capilar como consecuencia de la modificación del sistema poroso en función del consolidante utilizado. En el anexo 2 se adjuntan las curvas de absorción capilar para cada serie de tres probetas para cada uno de los consolidantes y formas de aplicación. Estos resultados están de acuerdo con el trabajo de Valdeon (1989), en el que indica que la aplicación de productos consolidantes en los materiales pétreos origina cambios drásticos en el coeficiente de absorción capilar.

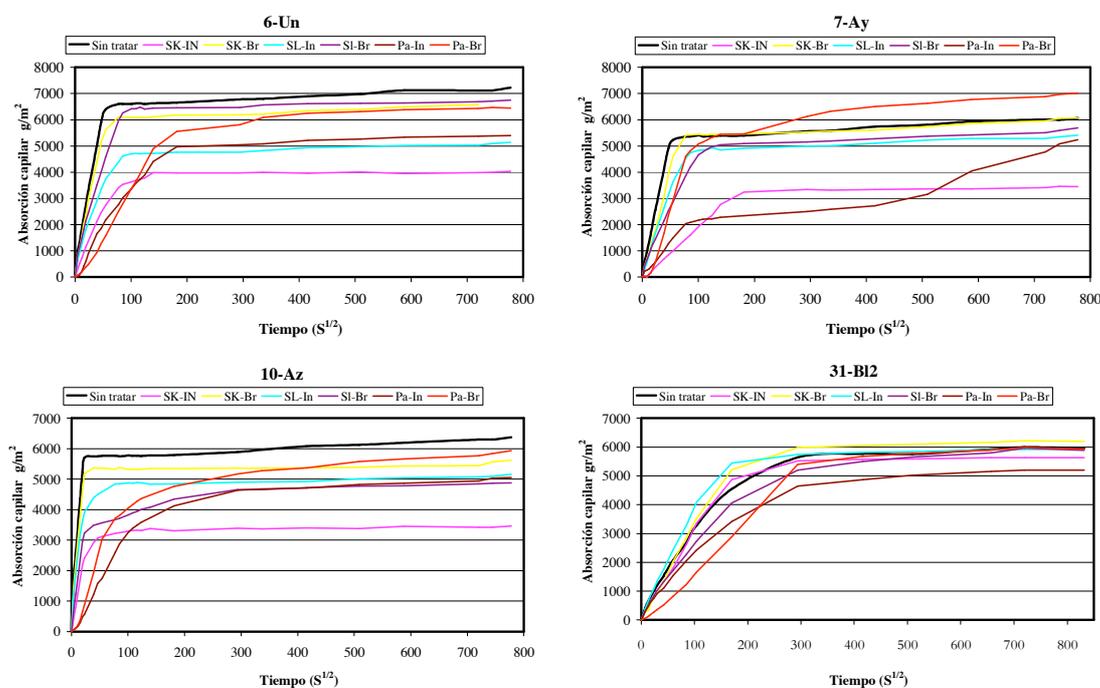


Figura VIII-4: Curvas de absorción capilar. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- Paraloid, In- inmersión y Br- brocha.

VIII.5.1.4.- Variaciones colorimétricas.

La caracterización de los cambios cromáticos es de gran interés, ya que los tratamientos de conservación deben preservar el aspecto inicial de la roca por lo que no resulta aconsejable aplicar productos que cambien excesivamente el color de los materiales pétreos.

En la tabla VIII-4 se reflejan los valores medios de los parámetros cromáticos de cada roca antes y después de su consolidación y las variaciones en color total ocasionadas por los consolidantes en cada una de las rocas. Estos valores objetivos se completan con las fotografías realizadas para cada roca antes y después de su consolidación con cada producto (figura VIII-5).

Los cambios de color se han valorado mediante la diferencia de color total (Fort, 1996):

$$\Delta E^* = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$$

donde **L** es la variación en la luminosidad, **a** es la relación rojo (+a) frente a verde (-a) y **b** es la relación amarillo (+b) frente a azul (-b).

Tabla VIII-4: Parámetros cromáticos y variación en el color de roca total para cada uno de los tratamientos aplicados.

6-Un	L*	a*	b*	Brillo 85°	Brillo 60°	Brillo 20°	ΔE
Sin consolidar	60,4	3,4	16,2	0,4	1,1	0,6	
Silicato de potasio	56	4,5	18,5	0,3	0,9	0,6	5,09
Silicato de litio	60,8	3	15,4	0,4	1	0,3	0,98
Paraloid	63,6	2,7	14	0,5	0,9	0,6	3,95

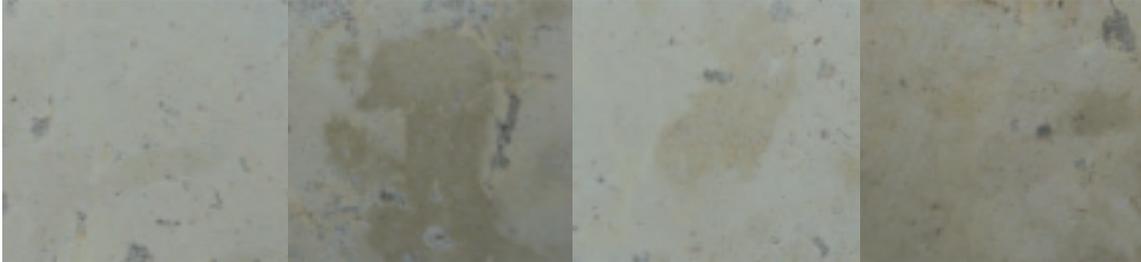
7-Ay	L*	a*	b*	Brillo 85°	Brillo 60°	Brillo 20°	ΔE
Sin consolidar	59,9	3,6	17,2	0,4	1	0,7	
Silicato de potasio	60,1	4,6	17,8	0,5	0,9	0,7	6,03
Silicato de litio	63,3	3	15,6	0,3	0,7	0,5	2,03
Paraloid	64,2	2,7	13,8	0,5	1,1	0,7	5,56

10-Az	L*	a*	b*	Brillo 85°	Brillo 60°	Brillo 20°	ΔE
Sin consolidar	67,2	5,2	19,2	0,4	1	0,7	
Silicato de potasio	63,7	4,7	17	0,3	0,9	0,6	4,16
Silicato de litio	64,2	4,3	15	0,5	0,8	0,6	5,24
Paraloid	56,5	5,5	20	0,4	0,9	0,7	10,73

31-B12	L*	a*	b*	Brillo 85°	Brillo 60°	Brillo 20°	ΔE
Sin consolidar	80,5	2,2	11,2	1,4	0,6	0,6	
Silicato de potasio	77,9	1,9	12,8	1,5	0,8	0,7	3,07
Silicato de litio	74,9	3	18	1,2-1,8	1,4	0,8	8,85
Paraloid	76,2	2,6	13,2	1,4	1,9	0,7	4,76

Las variaciones cromáticas que origina cada uno de los productos utilizados dependen del tipo de material caracterizado. Así, un mismo producto presenta diferentes valores de variación de color para cada material. Las variaciones de color total son inferiores al 6%, excepto en la roca 10-Az tratada con Paraloid y en la roca 31-B1-2 tratada con silicato de litio.

31-B12



6-Un



7-Ay



10-AZ



Figura VIII-5: Fotografías de la superficie del material pétreo antes y después de la aplicación de los consolidantes. De izquierda a derecha aparecen las fotos del material sin tratar, consolidado con silicato de potasio, silicato de litio y Paraloid B-72.

VIII.5.1.5.- Absorción y desorción libre de agua mediante el ensayo automatizado.

Para evaluar las modificaciones que se producen en el sistema poroso, y más concretamente en la cinética de los procesos hídricos en los materiales pétreos tras la aplicación de productos consolidantes, se han realizado ensayos automatizados de absorción y desorción hídrica sobre las mismas probetas antes y después de su consolidación por el método de inmersión (Buj *et al.*, 2007). En las arenitas, dada la pequeña modificación en estas propiedades hídricas por parte del Paraloid, únicamente se han realizado estos ensayos con el silicato de litio y con el silicato de potasio.

Absorción:

En las gráficas de absorción se ha representado en abscisas el tiempo expresado como raíz cuadrada del tiempo en segundos y en ordenadas se ha representado la cantidad de agua absorbida expresada en gramos. Se ha utilizado el parámetro gramos de agua absorbida en lugar de la absorción de agua para evitar posibles errores en el cálculo de la absorción de agua por el aumento en peso de la probeta tras su consolidación.

En la figura VIII-6 se han representado las curvas de absorción de una misma probeta antes de aplicar el consolidante (línea continua) y después de su aplicación (línea discontinua).

Tras la aplicación de los productos consolidantes se observa como se ha modificado sustancialmente la cinética del proceso de absorción y, por lo tanto, el sistema poroso del material. En todos los casos la aplicación de los consolidantes, como se muestra en la tabla VIII-5, supone una disminución en la cantidad de agua total absorbida por el material. Sin embargo, tras la aplicación de los consolidantes en las arenitas se observa una aceleración en el proceso de absorción en los estadios iniciales e intermedios del ensayo.

En las tres arenitas, las curvas de absorción iniciales estaban compuestas por tres tramos de diferente pendiente (y que pueden ser atribuidas a tres rangos de tamaño de poro preferentes) y tras la consolidación del material se han convertido en curvas que se descomponen únicamente en dos rectas con pendientes diferentes.

Las arenitas 6-Un, 7-Ay y 10-Az tras ser consolidadas con silicato de litio, presentan durante las primeras horas del ensayo una absorción de agua más rápida que antes de su consolidación. La duración de esta etapa es de 10 horas en 6-Un, 51 horas en 7-Ay y de 170 horas en 10-Az.

Tras ser consolidadas con silicato de potasio y, después de los primeros minutos del ensayo, estas arenitas presentan, al igual que con el silicato de litio, una etapa de absorción más rápida que antes de su consolidación. Esta etapa comienza en 6-Un después de la segunda hora del ensayo y tiene una duración de 36 horas. En 7-Ay esta etapa comienza después de la primera hora del ensayo y tiene una duración de 8 horas. Finalmente, en 10-Az esta etapa comienza después de la primera hora del ensayo y tiene una duración de 170 horas.

La aceleración descrita en los estadios iniciales e intermedios tras la consolidación del material puede deberse 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 así una red porosa con tamaño medio de poro inferior pero con mayor regularidad en la sección de los conductos (Brus y Kotlíć 1996; Mingarro *et al.*, 1996; Buj *et al.*, 2007). Esta regularización en el tamaño de los poros implicaría un aumento en la presión de succión capilar. No descartamos que parte de este aumento en la presión de succión se deba también a la modificación del ángulo de contacto entre el agua y las paredes del material al estar revestidos los poros por el consolidante.

En 31-BI2, los gramos de agua absorbidos por las probetas tratadas con los tres consolidantes son inferiores a lo largo de todo el ensayo a los gramos de agua absorbidos por la roca sin tratar. Como muestran los datos de la tabla VIII-5, la consolidación de esta roca con Paraloid presenta, a lo largo de todo el ensayo, una variación en la absorción inferior a la que provocan los silicatos alcalinos. Con los tres tratamientos, la cantidad de gramos de agua absorbidos después de la consolidación es ligeramente inferior a la del material tratado durante las primeras 70 horas del ensayo. En este punto, las probetas tratadas están prácticamente saturadas al 100% mientras que el material sin tratar continúa con el proceso de absorción.

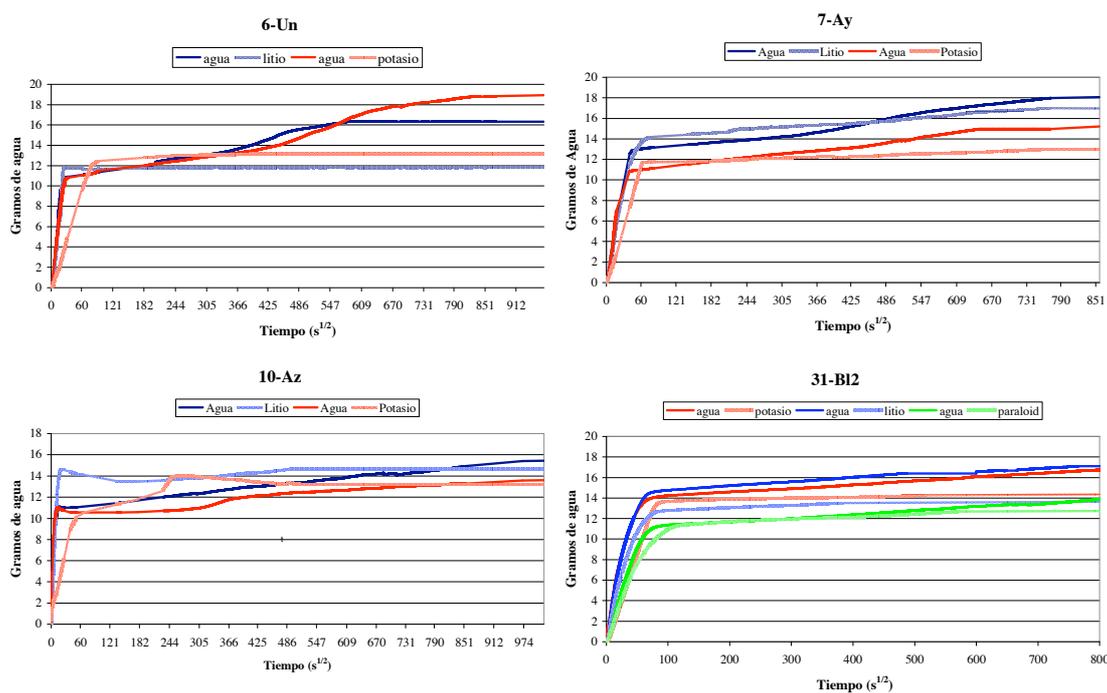


Figura VIII-6: Gráficas de gramos de agua absorbidos respecto al tiempo. En azul se ha representado la absorción para una misma probeta antes de la aplicación del silicato de litio (línea continua) y después de su aplicación (línea discontinua). En rojo se han representado, siguiendo la misma metodología, las probetas tratadas con silicato de potasio y en verde las tratadas con Paraloid.

Tabla VIII-5: Valores totales de agua absorbida en gramos para diferentes tiempos del ensayo para una misma probeta antes y después de su consolidación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio y Pa - Paraloid. En negrita aparecen los intervalos en los que la absorción es mayor tras consolidar la probeta.

	15 m	1h	8 h	1 día	2 días	6 días	total
6-Un1 agua	10,87	11,07	11,37	13,02	14,41	16,34	16,34
6-Un1 SL	11,75	11,72	11,72	11,81	11,81	11,82	11,82
6-Un2 agua	10,77	11,04	11,47	12,80	13,68	18,14	18,94
6-Un2 SK	4,59	9,63	12,44	13,07	13,19	13,19	13,19
7-Ay1 agua	10,46	13,03	13,44	14,14	15,12	17,68	18,07
7-Ay1 SL	9,30	13,66	14,43	15,12	15,45	16,82	16,98
7-Ay2 agua	9,30	10,99	11,54	12,49	13,08	14,97	15,21
7-Ay2 SK	5,36	11,47	11,80	12,12	12,24	12,87	13,00
10-Az1 agua	11,02	11,05	11,69	12,33	12,98	14,15	15,46
10-Az1 SL	14,54	14,18	13,48	13,81	14,31	14,68	14,68
10-Az2 agua	10,68	10,56	10,59	10,91	12,09	13,02	13,60
10-Az2 SK	7,16	10,08	11,81	13,97	13,47	13,22	13,22
31-BI2-1 agua	9,60	13,52	14,49	14,89	15,33	16,48	17,59
31-BI2-1 SL	4,82	10,26	13,84	14,01	14,09	14,26	14,26
31-BI2-2 agua	9,73	14,00	15,07	15,56	16,09	16,94	17,10
31-BI-2-2- SK	7,65	11,62	12,99	13,27	13,51	13,64	13,64
31-BI2-3 agua	6,05	10,26	11,58	11,97	12,43	13,48	14,12
31-BI2-3-Pa	5,13	8,57	11,56	11,94	12,18	12,73	12,73

Desorción:

Las curvas de desorción muestran como, tras la aplicación del silicato de litio y del silicato de potasio en las cuatro rocas caracterizadas, se origina un cambio en la cinética del proceso de secado en el material, siendo éste más lento y complicado (figura VIII-7), favoreciendo todos los mecanismos de alteración relacionados con la presencia de agua. Tras la consolidación de estas rocas con los silicatos alcalinos aumenta tanto su contenido de agua crítico como la retención de agua tras secado.

El contenido en agua crítico tras la consolidación con silicato de litio ha pasado en la roca 6-Un de 27,86% a 44,86%, en la roca 10-Az de 19,5% a 29,23%, en la roca 7-Ay de 35,66% a 40,24% y en la roca 31-BI2 de 26,36% a 29%. Tras la consolidación con silicato de potasio el contenido en agua crítico ha pasado de 26,77% a 62,90% en la roca 6-Un, de 34,68% a 45,56% en la roca 7-Ay, de 18,99% a 29,95% en la roca 10-Az y de 29,08% a 53,83% en la roca 31-BI2.

La retención de agua tras secado después de la consolidación con silicato de litio ha pasado en la roca 6-Un de 13,47% a 12,42%, en la roca 10-Az de 5,80% a 11,07%, en la roca 7-Ay de 22,52% a 24,29% y en la roca 31-BI2 de 5,97% a 8,40%. Tras la consolidación con silicato de potasio la retención de agua tras secado ha pasado de 10,97% a 11,31% en la roca 6-Un, de 23,61% a 22,31% en la roca 7-Ay, de 5,50% a 14,11% en la roca 10-Az y de 8,37% a 11,21% en la roca 31-BI2.

Tras aplicar el Paraloid en la roca 31-BI2 el secado del material es más lento y complicado variando el contenido de agua crítico de 29,42% a 40,88%. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los otros productos, en esta roca tras aplicar el Paraloid la retención de agua tras secado es inferior a la del material sin tratar.

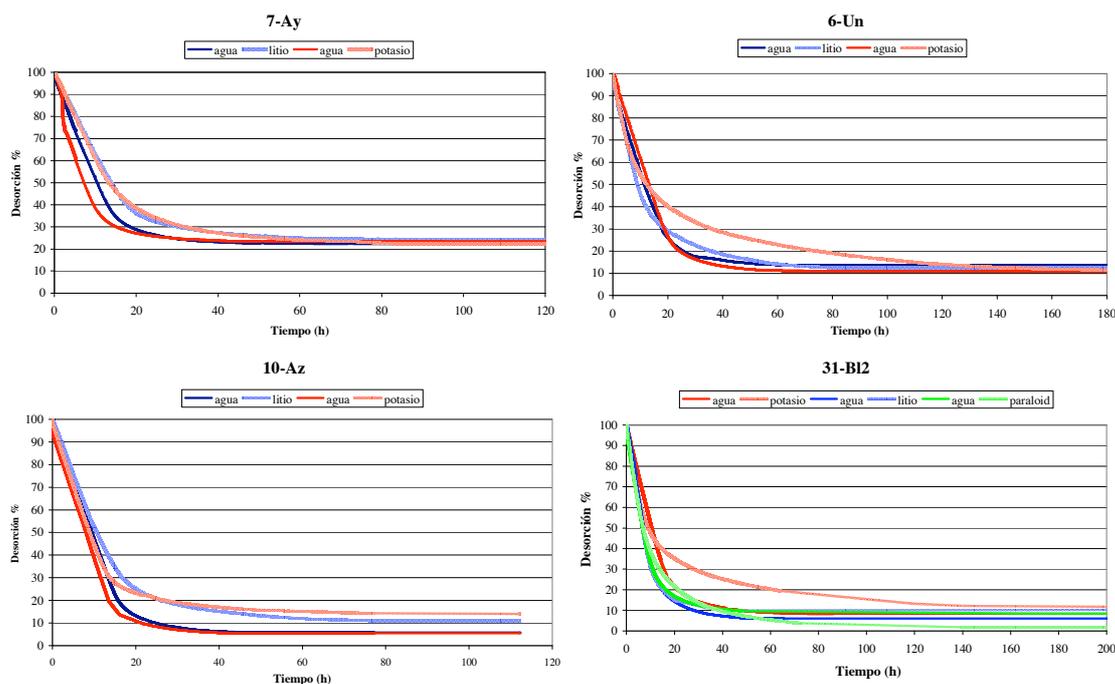


Figura VIII-7: Curvas de desorción antes de aplicar los consolidantes (línea continua) y después de aplicar los consolidantes (línea discontinua) en las mismas probetas. Las probetas tratadas con silicato de litio se han representado con color azul, las probetas tratadas con silicato de potasio se han representado con color rojo y las probetas tratadas con Paraloid se han representado con color verde.

VIII.5.2.- Variación en las propiedades mecánicas tras la aplicación de los consolidantes.

La evaluación de las propiedades mecánicas se ha realizado mediante la medida de la dureza superficial del material. La información que obtenemos mediante este ensayo sobre el efecto del tratamiento en el material es más significativa que la información que aportarían los ensayos mecánicos convencionales derivado de la escasa penetración que presentan los productos consolidantes, que en el mejor de los casos se reduce a unos centímetros (Navarro, 2005).

La medida relativa de la dureza superficial se ha realizado mediante el microdurómetro Shore-D en tandas de tres probetas antes y después de consolidar.

En la tabla VIII-6 se muestra el aumento de la dureza superficial en porcentaje con respecto a la dureza inicial de la probeta sin tratar. Todos los productos han provocado un aumento en la dureza superficial, siendo el silicato de potasio aplicado tanto por inmersión como con brocha el que ha generado un mayor aumento de la misma. También han mostrado una buena eficacia el silicato de litio aplicado por inmersión y el Paraloid aplicado con brocha.

	6-Un	10-Az	7-Ay	31-B12
S.L. inmersión	3,22	2,4	3,54	0,90
S.L. brocha	3,46	0,95	1,94	0,43
Pa. inmersión	1,18	1,57	1,89	0,79
Pa. brocha	2,96	4,97	3,72	0,52
S.K. inmersión	4,05	5,72	6,51	3,21
S.K. brocha	5,23	5,33	5,97	2,88

Tabla VIII-6: Variación en porcentaje respecto de la dureza Shore D inicial de las probetas tras la consolidación. (S.L- silicato de litio; S.K- silicato de potasio; Pa-Paraloid).

VIII.6.- Evaluación de la resistencia a la alteración.

Para determinar la resistencia a la alteración del material tratado y el grado de idoneidad de los productos seleccionados se han sometido las probetas al ensayo de envejecimiento artificial acelerado de cristalización de sales de acuerdo con el procedimiento de la norma “UNE-EN 12370 Determinación de la resistencia a la cristalización de sales”.

El número de ciclos realizados ha sido de 15 en el caso de las rocas detríticas y de 30 en el caso de la roca carbonatada 31-BI2, debido a su mayor resistencia frente al deterioro por cristalización de sales.

La evaluación de los cambios originados en el material pétreo tras los procesos de cristalización de sales se han llevado a cabo mediante la estimación de la pérdida de peso, examen visual de las alteraciones y variaciones en diferentes propiedades hídricas.

VIII.6.1.- Variación en peso y estudio morfológico de la alteración.

Los resultados del ensayo de cristalización de sales tras la aplicación de los consolidantes (tabla VIII-7) indican que la aplicación de los productos por inmersión supone una mejora en el comportamiento del material respecto a la aplicación de los productos con brocha. En las gráficas de variación en peso a lo largo del ensayo (figura VIII-8) se muestra el comportamiento de las rocas en función del consolidante aplicado. En abscisas se ha representado el número de ciclos de cristalización de sales y en ordenadas la variación en peso respecto al peso inicial de la probeta seca. En el anexo 4 se adjuntan las gráficas de variación en peso para cada serie de tres probetas para cada uno de los consolidantes y formas de aplicación.

Tabla VIII-7: Variación en peso de las rocas tras la realización del ensayo de cristalización de sales expresado en porcentaje respecto al peso inicial. S.C- probetas sin consolidar; SK IN- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por inmersión; SK BR- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por brocha; SL IN- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por inmersión; SL BR- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por brocha; PA IN- probetas consolidadas con Paraloid aplicado por inmersión; PA BR- probetas consolidadas con Paraloid aplicado por brocha.

	S C	SK IN	SK BR	SL IN	SL BR	PA IN	PA BR
31-BI2	-9,41	-2,33	-4,88	-3,33	-4,84	-4,01	-6,37
6-UN	-39,87	0,85	-31,50	-21,88	-40,51	-42,14	-52,63
7-AY	-43,85	-3,61	-34,33	-34,38	-42,94	-40,58	-43,81
10-AZ	-7,70	0,14	-2,40	-7,83	-7,38	-15,58	-7,02

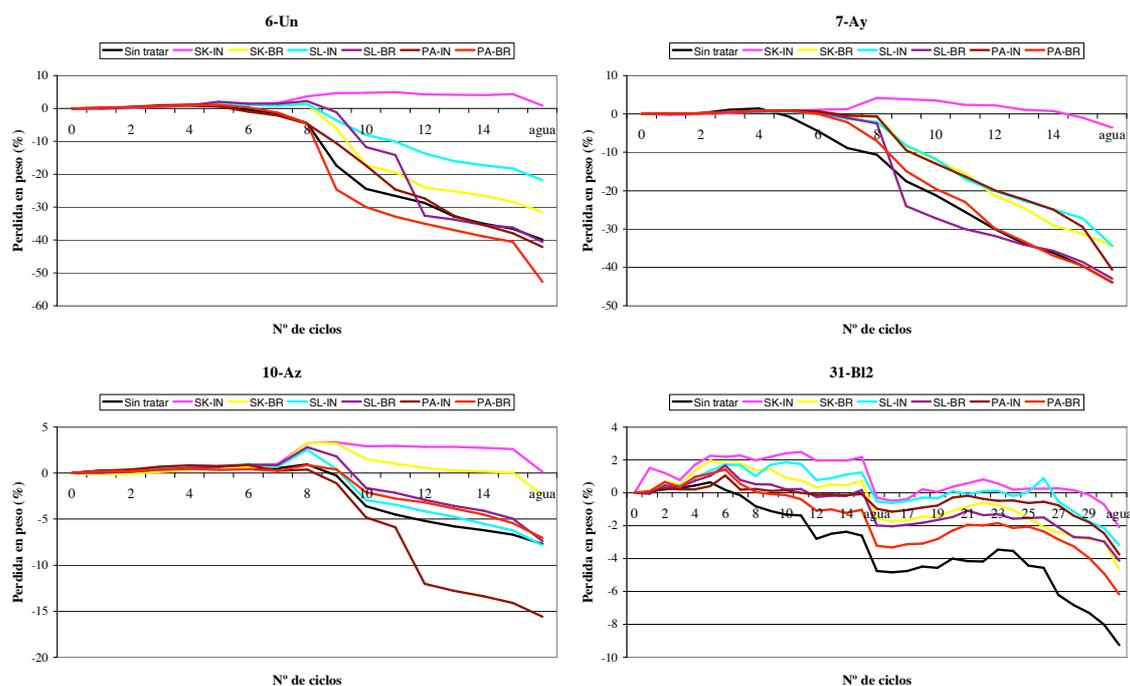


Figura VIII-8: Gráficas de variación en peso. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- Paraloid, In- inmersión y Br- brocha.

Silicato de potasio. Método de aplicación inmersión.

Tras aplicar este consolidante, las cuatro rocas caracterizadas presentan una pérdida en peso muy inferior a la del material sin tratar.

La pérdida de peso en las probetas de 6-Un y 10-AZ consolidadas con silicato de potasio aplicado por inmersión es inferior al 1% y no presentan de visu ningún tipo de deterioro (figura VIII-9A). En la arenita 7-Ay la pérdida en peso oscila entre 2,7% y 4,7%, mientras que en la roca 31-B12 oscila entre 1,55% y 3,3%. Ambas rocas muestran desagregaciones granulares en vértices y aristas (figura VIII-9B). Además, en la roca 31-B12 se aprecia una incipiente alteración por ruptura sin desplazamiento relativo en la probeta en el contacto entre las zonas bioturbadas con las zonas no bioturbadas (figura VIII-10). Estos datos confirman los obtenidos por el ensayo de permeabilidad.

Silicato de potasio. Método de aplicación brocha.

Tras la aplicación del silicato de potasio mediante brocha las rocas presentan una mejora en el comportamiento respecto al material sin tratar, especialmente en las rocas 10-Az y 31-B12 con unos valores de pérdida en peso inferior al 3% y al 5% respectivamente. Estas rocas presentan desagregaciones granulares en vértices y aristas con fragmentación ocasional y pérdida de material (figura VIII-9B y figura VIII-10).

Las arenitas 7-Ay y 6-Un tratadas con este producto han tenido una pérdida en peso del 34,3% y del 31,5% respectivamente. Estas probetas han comenzado a perder peso tras el ciclo octavo con un ritmo constante de un 5% por cada ciclo. La pérdida en peso ha sido consecuencia de la desplacación de la probeta según fragmentos de tamaño milimétricos perpendiculares a la estratificación por la existencia de zonas con diferente

grados de dureza y, en menor medida, por disgregación granular en las caras no tratadas (figura VIII-9C).

La desplazación de las capas superficiales tratadas es consecuencia de la acción del consolidante, que impide la difusión desde el interior del material de la solución salina. La disolución tiende a acumularse en la interfase entre la zona tratada y sin tratar, donde precipitan las sales y generan tensiones capaces de desprender esa capa externa.

Silicato de litio inmersión.

Tras la aplicación del silicato de litio por inmersión todas las rocas excepto 10-Az presentan una mejora en el comportamiento respecto al material sin tratar.

En la roca 10-Az se han generado disgregaciones granulares en vértices y aristas y en menor medida en alguna de sus caras (figura VIII-9B).

Las probetas caracterizadas de 6-Un han tenido un comportamiento heterogéneo. Una de ellas no ha sufrido ningún tipo de alteración, mientras que en el resto de las probetas de la tanda se observan importantes pérdidas de material, conservándose únicamente zonas parciales de las caras con un redondeamiento general de las probetas por arenización homogénea (figura VIII-9D). La arenita 7-Ay se ha degradado por la pérdida de pequeñas capas milimétricas perpendiculares a la estratificación, así como por disgregación granular en vértices, aristas y en gran parte de sus caras (figura VIII-9C). La pérdida de material en estas arenitas ha comenzado en los ciclos séptimo y octavo respectivamente, y se ha mantenido con la misma intensidad hasta el final del ensayo.

En la roca 31-B12, la pérdida en peso ha oscilado entre el 2,8 y 4% mostrando un buen comportamiento. La alteración de este material ha tenido lugar por desagregaciones granulares (figura VIII-10). Además, al igual que ocurría con las probetas tratadas con silicato de potasio, presenta una incipiente alteración por ruptura sin desplazamiento relativo en la probeta en el contacto entre las zonas bioturbadas con las zonas no bioturbadas.

Silicato de litio brocha.

Tras la aplicación del silicato de litio por brocha ninguna de las tres arenitas ha experimentado una mejora en su comportamiento. Las arenitas de 6-Un y una de las probetas de 10-Az tratadas con este producto han presentado un pésimo comportamiento sufriendo desplazaciones milimétricas e incluso centimétricas como consecuencia de la formación de zonas superficiales endurecidas (figura VIII-9C). Esta pérdida de la capa superficial provoca que queden nuevas zonas expuestas a la alteración.

Sin embargo, la roca 31-B12 presenta una pérdida en peso un 50% inferior a la del material sin tratar. Este material se ha alterado por desagregaciones granulares en vértices, caras y aristas con fragmentación ocasional y pérdida de material (figura VIII-10).

Paraloid inmersión y brocha.

Las arenitas 6-Un, 7-Ay y 10-Az tratadas con Paraloid no han experimentado mejora alguna en su comportamiento respecto al material sin tratar. La forma de alteración que presentan las rocas 6-Un y 7-Ay ha sido similar a la experimentada por las probetas sin tratar: arenización homogénea (figura VIII-9D), con la diferencia de que algunas de estas probetas preservan las zonas centrales de algunas de sus caras tratadas. En 10-Az se han desarrollado desagregaciones granulares en vértices y aristas y en menor medida en alguna de sus caras (figura VIII-9B).

Por su parte, la roca 31-B12 presenta una pérdida en peso un 58% inferior respecto a la de roca sin tratar tras aplicar el Paraloid por inmersión y un 33% inferior tras aplicar el Paraloid con brocha. En ambos casos, la roca ha sufrido desagregaciones granulares en vértices, caras y aristas con fragmentación ocasional y pérdida de material (figura VIII-10).

En resumen, las tres arenitas han sufrido durante el ensayo de cristalización de sales una alteración más intensa que la roca 31-B12, dependiendo el tipo de alteración tanto del consolidante como de su método de aplicación. En la figura VIII-9 se muestran las principales forma de deterioro en estas arenitas.

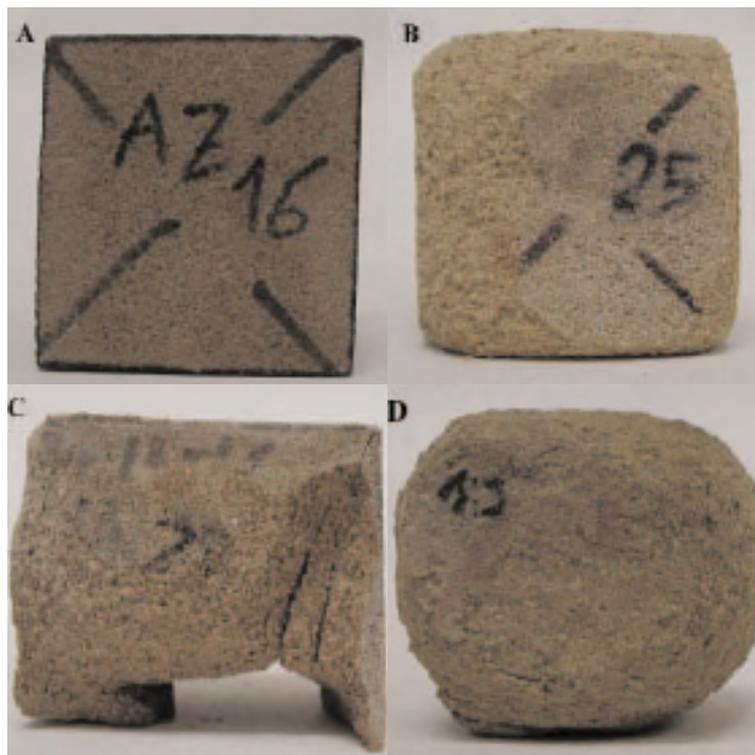


Figura VIII-9: Formas de alteración en las arenitas tratadas 6-Un, 7-Ay y 10-Az tras 15 ciclos de cristalización de sales. A) Sin alteración (10-Az Silicato de potasio-inmersión); B) Arenización débil (10-Az Paraloid-inmersión); C) Desagregación granular y desplazación (6-Un silicato de potasio-brocha); D) Arenización homogénea (7-Ay Paraloid-brocha).

En la figura VIII-10 se muestra el deterioro que tiene lugar en la roca 31-B12 tras el ensayo de cristalización de sales. La morfología de alteración en este material es independiente del consolidante utilizado y de su modo de aplicación, aunque la intensidad del proceso depende del producto utilizado. Esta roca se ha alterado por desagregaciones granulares principalmente en vértices y aristas y, en menor medida, en las caras, por fragmentación ocasional con pérdida de material y por una incipiente alteración por ruptura sin desplazamiento relativo en el contacto entre las zonas bioturbadas y las zonas no bioturbadas.

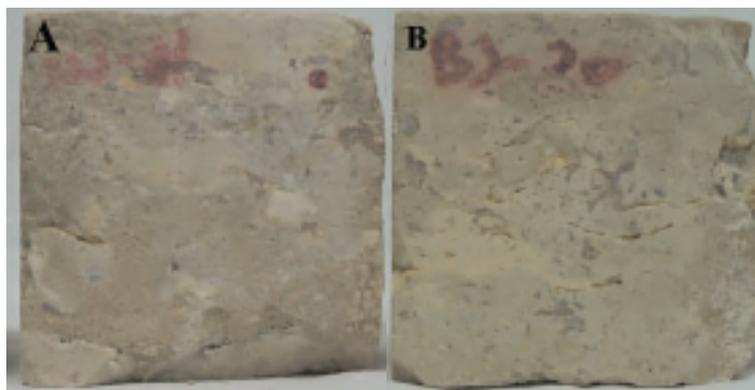


Figura VIII-10: Formas de alteración en la roca 31-B12 tras 30 ciclos de cristalización de sales. A) Probeta tratada con silicato de potasio aplicado por brocha; B) Probeta tratada con Paraloid aplicado por inmersión.

VIII.6.2.- Variación de las propiedades hídricas.

La alteración de los materiales pétreos genera importantes cambios en su sistema poroso conforme avanza la alteración, por ello, se ha puesto un especial énfasis en la variación que tiene lugar en las propiedades hídricas del material tras los fenómenos de cristalización de sales. Estas variaciones indican no solo el grado de alteración que ha sufrido el material, sino también la alterabilidad potencial del mismo y por lo tanto aportan información muy útil sobre su durabilidad.

Los ensayos realizados han sido el ensayo de absorción libre de agua a presión atmosférica y el ensayo de absorción capilar. Estos ensayos se han realizado antes y después del ensayo de cristalización de sales sobre las mismas probetas. Los ensayos hídricos tras cristalización de sales no se han realizado sobre las arenitas debido a su alto grado de deterioro que originaba una continua pérdida de material durante la realización de los ensayos hídricos.

En la tabla VIII-8 se muestran los datos de la variación en porcentaje respecto del valor inicial de los parámetros calculados a partir de los ensayos realizados tras la aplicación de los productos en función del tipo de consolidante y de su método de aplicación.

Tabla VIII-8: Variación en porcentaje tras la cristalización de sales en la roca 31-B12 del contenido en humedad (W), porosidad abierta (P₀) y coeficiente de absorción capilar (C.A.C.).

	Material sin tratar	Silicato potasio inmersión	Silicato potasio brocha	Silicato litio inmersión	Silicato litio brocha	Paraloid inmersión	Paraloid brocha
W	12,28%	21,53%	16,08%	18,35%	13,44%	14,78%	9,57%
P ₀	11,27%	30,21%	26,04%	27,75%	23,15%	24,15%	20,24%
C.A.C	18,01%	2,01%	22,21%	10,12%	46,11%	28,16%	110,32%

Las probetas no tratadas han presentado un menor aumento en el contenido en humedad y en la porosidad abierta tras el ensayo de cristalización de sales que las probetas tratadas con los diferentes consolidantes, aunque en términos absolutos la absorción y la porosidad del material tratado son inferiores a la del material sin tratar. Por su parte, el coeficiente de absorción capilar ha experimentado un mayor aumento en las probetas tratadas con Paraloid y con los silicatos alcalinos aplicados por brocha que en las probetas no tratadas.

En la figura VIII-11 se presentan las curvas de succión capilar tras el ensayo de cristalización de sales, tanto para la roca sin tratar como para cada uno de los diferentes tratamientos y técnicas de aplicación.

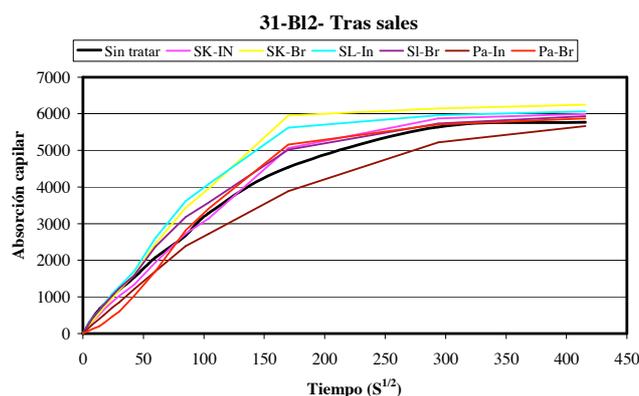


Figura VIII-11: Curvas de absorción capilar tras el ensayo de cristalización de sales en la roca 31-B12. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación. SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- Paraloid, In- inmersión y Br- brocha.

VIII.7.- Conclusiones.

VIII.7.1.- Evaluación de la penetración de consolidantes.

-Las tres arenitas caracterizadas se comportan de manera similar para un mismo producto, presentando una mayor penetración para los silicatos alcalinos que para el Paraloid B-72. La penetración de los consolidantes en la roca 31-B12 ha sido inferior a la registrada en las arenitas. Estos productos actúan en el sistema poroso reduciendo la porosidad abierta y modificando la distribución de tamaño de poro en la roca.

-Ninguno de los productos muestra en el microscopio electrónico de barrido la formación de una capa continua, permitiendo la transferencia de humedad entre la piedra y el exterior. Sin embargo, los resultados del ensayo de cristalización de sales han mostrado como tras la aplicación del silicato de potasio y del silicato de litio mediante brocha tiene lugar una desplazación de capas milimétricas superficiales.

VIII.7.2.- Variación de las propiedades físicas y mecánicas tras la aplicación de los consolidantes.

-La aplicación de estos tres consolidantes en estas rocas ha originado una modificación en el sistema poroso, generando una disminución en la porosidad total de la roca, absorción y coeficiente de absorción capilar, así como una modificación en la cinética de los procesos de absorción y desorción. Los tres productos caracterizados generan cambios en la densidad del material, creando aumentos en la densidad aparente y disminuciones en la densidad real.

-El silicato de potasio aplicado por inmersión es el producto que produce una mayor reducción en la absorción y en la porosidad abierta de estos materiales, mientras que el Paraloid B-72 es el producto que provoca una mayor reducción en el coeficiente de absorción capilar. Estas variaciones en las propiedades hídricas son consecuencia de la reducción de la porosidad total, el aumento de la microporosidad y la reducción del grado de interconexión del sistema poroso.

-Los productos aplicados no crean variaciones importantes en el color de la roca, por lo que su aplicación no supone un impacto visual importante. Estas variaciones dependen tanto del tipo de roca como del consolidante aplicado. En general, los resultados obtenidos muestran una variación colorimétrica inferior al 6%, salvo en la roca 10-Az tratada con Paraloid y en la roca 31-B12 tratada con silicato de litio.

-Los resultados obtenidos mediante los ensayos hídricos automatizados muestran la existencia de una importante variación en la cinética de los procesos de absorción y desorción como consecuencia de la modificación generada en el sistema poroso por la aplicación de los consolidantes. Estas modificaciones dependen tanto del producto utilizado como del sistema poroso del material pétreo caracterizado. La modificación que provocan los consolidantes en el sistema poroso no afecta a todas las clases porométricas por igual.

-Tras la consolidación de las rocas 6-Un, 7-Ay y 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. 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 así 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.

-Tras consolidar la roca 31-B12 con los tres productos, la cantidad de gramos de agua absorbidos por las probetas tratadas es menor a lo largo de todo el ensayo que la cantidad absorbida por las probetas sin tratar.

-Todos los productos han provocado un aumento en la dureza superficial del material, siendo el silicato de potasio aplicado tanto por inmersión como por brocha el que ha generado un mayor aumento de la misma. También han mostrado una buena eficacia el silicato de litio aplicado por inmersión y el Paraloid aplicado por brocha.

VIII.7.3.- Evaluación de la resistencia a la alteración.

-En la roca 31-B12 la aplicación de los tres consolidantes por ambos métodos de aplicación, supone una mejora en el comportamiento respecto al material sin consolidar en el ensayo de cristalización de sales.

-En las arenitas, las probetas tratadas con silicato de potasio aplicado por ambas técnicas presentan una mejora en el comportamiento del material respecto al material sin tratar. El silicato de litio únicamente produce una mejora respecto al material sin tratar en 6-Un y 7-Ay tras su aplicación por inmersión, presentando unos resultados del mismo orden que las muestras sin tratar tras su aplicación por brocha. Las arenitas tratadas con Paraloid no han presentado mejoras en su comportamiento, e incluso en la roca 6-Un tras la aplicación de este producto por brocha y en la roca 10-Az tras su aplicación por inmersión presentan una pérdida en peso mayor que el material sin tratar.

-Las arenitas han presentado diferentes formas de deterioro en función del consolidante y del método de aplicación. En cambio, el deterioro presente en la roca 31-B12 es independiente tanto del consolidante como del método de aplicación, aunque la intensidad del proceso depende del producto utilizado.

VIII.7.4.- Evaluación de la efectividad de los consolidantes.

-Los resultados obtenidos tras los diferentes ensayos para evaluar los consolidantes proporcionan datos objetivos para descartar aquellos tratamientos que se consideren poco efectivos. Sin embargo, dada la gran cantidad de variables a la que la roca se ve sometida tras su puesta en obra y que no son posibles de reproducir conjuntamente en laboratorio, no se puede concluir que los resultados obtenidos a partir de este tipo de estudios proporcionen una garantía total acerca del posible tratamiento seleccionado.

-Los resultados de esta investigación ponen de manifiesto la importancia de los estudios previos para la selección del producto y sistema de aplicación. La aplicación de este tipo de tratamientos debe considerarse como operaciones excepcionales y no rutinarias. La respuesta obtenida para cada tratamiento ha dependido del sistema poroso del material pétreo, por ello, no se pueden extrapolar los resultados de un material a otro y se hace necesario ensayar cada material bajo unas condiciones lo más parecidas posibles a las reales.

-Los consolidantes aplicados se han depositado en la red porosa del material y han originado modificaciones en la configuración de su sistema poroso. Los tratamientos de conservación aplicados han disminuido sensiblemente las capacidades hídricas de las rocas caracterizadas, dependiendo esta variación del tipo de consolidante y de su modo de aplicación.

-La aplicación de estos productos por inmersión en las cuatro rocas supone una mejora respecto de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, físicos y de alterabilidad tras aplicarlos con brocha.

-Ninguno de los tres productos aplicados ha originado un impacto visual importante.

-Los resultados de los principales ensayos realizados para evaluar la efectividad de los consolidantes en las arenitas de Uncastillo (6-Un), Ayerbe (7-Ay) y Alcañiz (10-Az) y en la roca carbonatada de Blancas (31-BI2) se han sintetizado en la tabla VIII-9.

-En la roca 31-BI2 la aplicación de los tres productos implica un aumento elevado en la resistencia del material frente al ensayo de cristalización de sales, un aumento en la dureza superficial, una variación cromática prácticamente nula y unas variaciones similares en las propiedades hídricas. Los resultados obtenidos indican la aptitud de los tres consolidantes para su uso en este material.

-Los resultados obtenidos en las arenitas 6-Un y 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.

-Los resultados obtenidos en la arenita 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.

-La escasa penetración del Paraloid en las arenitas, junto con el mal comportamiento frente al deterioro por cristalización de sales, desaconsejan el uso de este producto para la consolidación de estos materiales.

-Para mejorar el comportamiento de rocas como las arenitas 6-Un y 7-Ay sería aconsejable utilizar tratamientos de protección previos a su colocación.

Tabla VIII-9: Variación en porcentaje de la pérdida en peso, color (ΔE), coeficiente de absorción capilar (C.A.C.), porosidad abierta (P_0), absorción (W) y dureza superficial Shore D tras aplicar los consolidantes. SK IN- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por inmersión; SK BR- probetas consolidadas con silicato de potasio aplicado por brocha; SL IN- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por inmersión; SL BR- probetas consolidadas con silicato de litio aplicado por brocha; PA IN- probetas consolidadas con Paraloid aplicado por inmersión; PA BR- probetas consolidadas con Paraloid aplicado por brocha.

	Variación en peso (%)	Relación en peso entre material tratado frente a material sin tratar (%)	Color ΔE (%)	C.A.C (%)	P_0 (%)	W(%)	Shore D (%)	Penetración
31-BI2 Sin tratar	-9,41							
SK IN	-2,33	75,24	3,07	7,07	-21,93	-22,99	3,21	media
SL IN	-3,33	64,61	8,85	28,98	-16,44	-17,24	0,90	media
PA IN	-4,01	57,39	4,76	-26,12	-13,54	-13,82	0,79	baja
SL BR	-4,84	48,57	8,85	-14,68	-7,56	-8,05	0,43	media
SK BR	-4,88	48,14	3,07	12,75	-10,77	-11,25	2,88	media
PA BR	-6,37	32,31	4,76	-43,51	-0,31	-0,24	0,52	baja
6-Un Sin tratar	-39,87							
SK IN	0,85	102,13	5,09	-68,79	-42,66	-38,28	4,05	media
SL IN	-21,88	45,12	0,98	-37,89	-15,86	-12,58	3,22	media
SK BR	-31,5	20,99	5,09	-14,59	-15,97	-4,51	5,23	media
SL BR	-40,51	-1,61	0,98	-49,02	-16,84	-3,94	3,46	baja
PA IN	-42,14	-5,69	3,95	-64,41	-5,84	-3,02	1,18	baja
PA BR	-52,63	-32,00	3,95	-86,85	-0,84	-0,78	2,96	baja
7-AY Sin tratar	-43,85							
SK IN	-3,61	91,77	6,03	-85,17	-38,43	-37,70	6,51	media
SK BR	-34,33	21,71	6,03	-18,04	-11,87	-5,85	5,97	media
SL IN	-34,38	21,60	2,03	-54,15	-20,19	-14,60	3,54	media
PA IN	-40,58	7,46	5,56	-92,82	-6,03	-4,27	1,89	baja
SL BR	-42,94	2,08	2,03	-56,99	-13,92	-7,89	1,94	baja
PA BR	-43,81	0,09	5,56	-49,64	-6,86	-3,68	3,72	baja
10-AZ -Sin tratar	-7,7							
SK IN	0,14	101,82	4,16	-54,2	-40,35	-41,57	5,72	media
SK BR	-2,4	68,83	4,16	-20,67	-1,02	-1,17	5,97	media
PA BR	-7,02	8,83	10,73	-83,99	-0,73	-1,03	4,97	baja
SL BR	-7,38	4,16	5,24	-18,37	-0,43	-1,85	0,95	baja
SL IN	-7,83	-1,69	5,24	-24,50	-13,24	-13,62	2,4	media
PA IN	-15,58	-102,34	10,73	-92,81	-2,52	-2,65	1,57	baja

CAPÍTULO IX.- CONCLUSIONES

CAPÍTULO IX.- 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 Tabuena (11-Ta)) cumplen las solicitudes 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 Albortón (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), Noguieruelas (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 sollicitaciones más restrictivas de tipo mecánico respecto de los ensayos de resistencia a flexión y compresión, mientras que las rocas carbonatadas recristalizadas calcíicas 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 calcíica 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 biomicritas tienen un comportamiento 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 dolomicrita, 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 Albortón (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 tamaño. 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), Villalba (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 $0,1 \mu\text{m}$, 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 $0,1 \mu\text{m}$ 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 $0,1 \mu\text{m}$, 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-B12) 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 mas 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-B12) ha sido inferior a la registrada en las arenitas.

-En la roca de Blancas (31-B12) 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-B11 y 31-B12)), recristalizaciones de la matriz a microesparita y pseudoesparita (Fraga (9-Fr), Puebla de Albortón (13-Pu), Villarluego (16-VI-I), Tortajada (28-Crt) y Blancas (31-B13)), discontinuidades como las juntas estilolíticas (Abanto (29-A)), orientaciones preferentes de componentes de la roca (Tudela (8-Tu)) y parches esparíticos (Blancas (31-B12) 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-B13) tras la cristalización de sulfato de magnesio. En estas rocas el proceso predominante es la cristalización de sales y génesis de nuevos 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 isotrópica tras la cristalización de la solución de sulfato magnésico.

-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 materiales 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 intrusion 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.

CAPÍTULO X.- BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO X.- BIBLIOGRAFÍA

Accardo, G., Rossi-Doria, P., Sammuri, P. y Tabasso, M. (1981). Artificial weathering of Carrara Marble: Relationships between the induced variations of some physical properties. *International Symposium of the Conservation of Stone II, Bologna*, 1: 243-273.

Agustí, J., Cabrera, Ll., Anadón, P. y Arbio, S. (1988). A late Oligocene-Early Miocene rodent biozonation from the SE Ebro Basin (NE) Spain. A potencial mammal stage stratotype. *Newsletter Stratigraphy*. 18 (2): 81-97.

Alfes, CH. (1991). Relationship between the microstructure and fracture mechanics parameters of sandstones, Fracture process. *Concrete, Rocks and Ceramics*: 76-82.

Alonso, F.J. (1986). *Caracterización petrofísica y alterabilidad de calizas y dolomías*. Tesis Doctoral. Departamento de Petrología, Universidad de Oviedo. 209 p.

Alonso, F.J., Esbert, R.M. y Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Boletín geológico y minero*, T. XCVIII-II: 226.237.

Alonso-Zarza, A.M., Armenteros, I., Braga, J.C., Muñoz, A., Pujalte, V., Ramos, E. (coords), Aguirre, J., Alonso-Gavilan, G., Arenas, C., Baceta, J.I., Carballeira, J., Calvo, J.L., Corrochano, A., Fornós, J.J., González, A., Luzón, A., Martín, J.M., Pardo, G., Payros, A., Pérez, A., Pomar, L., Rodríguez, J.M. y Villena, J. (2002). Tertiary. *The Geology of Spain* (W. Gibbons T Moreno, Eds). Geological Society (London), 293-334.

Allen, D., Coates, G., Ayoub, J. y Carroll J. (1988). Probing for permeability: an introduction to measurements with a Gulf Coast case study. *The technical Review*, 36(1): 6-20.

Arenas, C. (1993). *Sedimentación y paleogeografía del Terciario del margen Pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. 858 p.

Arenas, C., Millán, H., Pardo G. y Pocoví A. (2001). Ebro basin continental sedimentation associated with late compressional Pyrenean tectonics (north-eastern Iberia): control on basin margin fans and fluvial systems. *Bassin Research*, 13: 65-89.

Arnold, A. y Zehnder, K. (1990). Salt weathering on monuments. *Advanced workshop analytical methodologies for the investigation of damaged stones*, Pavia (Italy): 14-21.

American Society for Testing and Materials (1978). *Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of natural building stone*. In 1978 Annual book of A.S.T.M. Standards, Parte 19, norma C 97-47: 1-3.

American Society for Testing and Materials (1992). *Standard Test Methods for rubber property - durometer hardness*. ASTM D 2240 vol. 09.01 USA.

Baer, N.S. y Sneathlge, R. (1997). Saving our architectural heritage. The conservation of historic stones structures. *Atmospheric Environment*, 32 (2): 261-262.

Beard, D. C. y Weyl, P. K. (1973). Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *Diagenesis of Sandstones, AAPG Reprint Series*, 20: 186-206.

Bell, F.G., (1978). The physical and mechanical properties of the Fell sandstones, Northumberland, England. *Engineering Geology*, 12: 1-29.

Bell, F.G. (1993). *Engineering Geology*. Blackwell, Oxford. 359p.

Bell, F.G. (1993). Durability of carbonate rock as a building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology*, 21: 187-200.

Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R. y Ordoñez, S. (1999). Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*, 204: 68-178.

Benavente, D. (2002). *Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante, 289p.

Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R. y Ordoñez, S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74: 113-127.

Bidner, T., Mirwald, P. W., Recheis, A. y Brüggerhoff, S. (2002). Stone as sensor material for weathering. In: Prikryl, R. y Viles, H. A. (eds) *Understanding and Managing Stone Decay*, The Karolinum Press, Prague: 97-111.

Bourgès, V. (2006). *Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering*. Tesis doctoral. Universität München, 206p.

Bousquie, P. (1979) *Texture et porosité des roches calcaries*. Tesis doctoral, Université Pierre et Marie Curie, París VI 191 p.

Brus, J. y Kotlík, P. (1986). Cracking of organosilicone stone consolidants. *Studies in Conservation*, 41 (1): 55-59.

Buj, O. y Gisbert, J. (2006): Evaluation of three consolidants in Miocene sandstones of the Ebro Basin. *Heritage, Weathering and conservation*. Edited by: R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras & C. Vazquez-Calvo, 2: 741-748.

Buj, O. y Gisbert, J. (2006): Cuantificación de la porosidad en areniscas mediante análisis digital de imágenes. *Geogaceta*, 41: 35-39.

Buj, O. y Gisbert, J. (2007). Caracterización petrofísica de tres variedades comerciales de areniscas Miocenas del valle del Ebro. *Materiales de construcción*, 287 (57): 62-73.

Buj, O., Gisbert, J. y Colucci, M. F. (2007). Variaciones en el sistema poroso de materiales pétreos tras la aplicación de productos de conservación. *Revista de la sociedad española de mineralogía MACLA*, 7: 85.

Cade, C.A., Evans, I.J. y Byrant, S.L. (1994). Analysis of permeability controls: a new approach. *Clay Minerals*, 29: 491-501.

Camara, P. y Klimowitz, J. (1985). Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica (Cuenca de Jaca y Tresp). *Estudios geológicos*, 41: 391-404.

Carey, P.F. y Curran, J.M. (2000). High resolution characterization of permeability in arenaceous building stones. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 120: 175-185.

Caye, R., Pierrot, R. y Argot, J.P. (1970). Methodes de Visualisation des Milieux Poreux en Uve de leur Analices Quantitative au Microscope. *Bulletin Société Francaise Mineralogie et Cristolografie*, 93: 571-578.

Cerdeño del Castillo, F.J., Díaz, R., González, I., López González-Mesones, F., Obis, J., Pérez, A., Regueiro, M., Tirado, A. y Vera, R. (2007). *La piedra en la arquitectura contemporánea*. Edita Aitemin, 245p.

Chapman, R. W. (1980). Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian desert. *American Journal of Science*, 280: 116- 129.

CRC Handbook of Chemistry and Physics (2005). Lide DR (eds), CRC Press, Boca Raton.

Charola, A. E. y Weber, J. (1992). The hydration dehydration mechanism of sodium sulphate, in Delgado-Rodrigues, J., Henriquez, F. and Jeremias, J. T. (Eds), *Proceedings of VII International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, LNEC*, 2: 581590.

Cooke, R. U. y Smalley, I. J. (1968). Salt weathering in deserts, *Nature*, 220: 1226-1227.

Coster, L. y Chermant, J.L. (1989). *Précis d'analyse d'images* - CNRS Press, Paris, 560 p.

Correns, CW (1949). Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discuss Faraday Society*, 5: 267-271.

Crabtree, S.J., Ehrlich, R. y Prince, C. (1988). Evaluation of strategies for segmentation of blue-dyed pores in thin section of reservoir rocks. *Computer vision, graphics and image processing*, 28: 1-28.

Cultrone, G., Sebastian, E. y Ortega Huertas, M. (2007). Durability of masonry systems: a laboratory study. *Construction and Building Materials*, 21: 40-51.

Davis, J.C., 1973. *Statistics and Data Analysis in Geology*. Wiley, New York, N.Y. 550p.

Davis, E. (1983). Thinning algorithms: A critique and now methodology. *Pattern Recognition*. 14: 53-63.

Davison, A.P. (1986). An investigation into the relationship between salt weathering debris production and temperature. *Earth surface Processes and Landforms*, 11: 335-341.

Daws, J.A. y Prosser, D.J. (1992). Scales of permeability heterogeneity within the Brent group. *Journal of Petroleum Geology*, 15(4): 397- 418.

Dean, W.E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparasion with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44: 242-248.

Dearman, W.R. (1982). Selection of sandstone for architectural purposes. *Proceedings of 4th Congress, IAEG*, 6: 333-344.

Delgado Rodrigues, J. (1996). Conservation of granitic rocks with application to the megalithic monuments. Conclusions report. In *Degradation and conservation of granitic rocks in monuments*. Protection and Conservation of European Cultural Heritage Research Report 5. Brussels: European Commission. 161-242.

Delgado Rodríguez, J. (2001). Swelling behaviour of stones and its interest in conservation: an appraisal. *Materiales de construcción*, 263-264: 183-196.

Díaz-Pache, F. y Esbert, R.M. (1994). Técnicas instrumentales aplicadas al control de la penetración de tratamientos de consolidación en piedra. *Ingeniería Civil*, 96: 117- 124.

Doehne, E. (1994). In situ dynamics of sodium sulfate hydration and dehydration in stone pores: observation at high magnification using environmental scanning microscopy. In Fassina, V., Ott, H. and Zezza, F. (Eds), *Proceedings of III International Congress on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, CMU, Venice*: 143-150.

Dreyer, T., Scheie, A. y Walderhaug, O. (1990). Minipermeameter-based study of permeability trends in channel sand bodies: *The American Association of Petroleum Geologists* 74(4): 359-374.

Duellman y Heitfeld. (1978). Influence of grain fabric anisotropy on the elastic properties of rocks. In: *3rd international congress, international association for Engineering Geology*. Madrid. V.I, S. II: 150-162.

Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.), *Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir*: 108-121.

Esbert, R.M. y Ordaz, J. (1985). Alteración y alterabilidad de las piedras de construcción: criterios petrofísicos y ensayos de laboratorio. *I congreso de patología en la edificación, C.O.A.C.*, Barcelona, 15 p.

Esbert, R.M., Ordaz, J., Alonso, F.J. y Montoto, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Col.legi d'aparelladors i Arquitectes Tecnicos de Barcelona, Barcelona, 139pp.

Evamy, B.D. (1963). The application of a chemical staining technique to a study of dedolomitization. *Sedimentology*, 2: 164-170.

Evans, I.S. (1970). Salt crystallization and rock weathering: A review. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 19: 155-177.

Everett, D.H. (1961). The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Transactions of the Faraday Society*, 465(57,9): 1441-1451.

Fahy, M.P. y Guccione, M.J. (1979). Estimating strength of sandstones using petrographic thin-section data. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 16 (4): 467-485.

Fahey, B. D. (1986). A comparative laboratory study of salt crystallization and salt hydration as potential weathering agents in deserts, *Geografiska Annaler*, 68A: 107-111.

Fitzner, B. y Snethlage, R. (1982). Zum Einfluß der Porenradientenverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. *Bautenschule Bausan*, 3-82: 97-102.

Fitzner, B. (1990). Porosity analysis a method for the characterization of building stones in different weathering states. *Proceedings of the International Symposium The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites Preservation and Protection*, Athen, Marinos & Koukis (Ed.), Balkema, Rotterdam. 19.-23.9.88, Vol. 4: 2031-2037.

Fitzner, B. (1994). Porosity properties and weathering behaviour of natural stones methodology and examples. In: *Stone materials in monuments: diagnosis and conservation*, 24-30.

Flatt, R.J. (2002). Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, 242: 435-454.

Folk, R.L. (1962). Spectral subdivision of limestones types. In: W.E. Ham. Ed, Classification of carbonate rocks. *The American Association of Petroleum Geologists*, 1 : 62-84.

Fort, R. (1996). Caracterización cromática de los materiales de construcción. En *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Editorial Complutense, 231-236.

Fort, R. (1996). El agua en los materiales pétreos: comportamiento. *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Editorial Complutense, 237-248.

Franzini, M. (1995). Stones in monuments: natural and anthropogenic deterioration of marble artefacts. *European Journal of Mineralogy*, 7: 735-743.

Fredrich, J.T., Evans, B. y Wong, T.F. (1990). Effect of grain size on brittle and semibrittle strength: implications for micromechanical modeling of failure in compression. *Journal of Geophysical Research*, 95: 10,907-10,920.

García de los Ríos Cobo, J. y Báez Mezquita, J.M. (2001). *La piedra en Castilla y León*; (Castilla y León. Consejería de Educación y Cultura) 344 p.

García del Cura, M. A., Benavente, D., Bernabéu, A. y Martínez-Martínez, J. (2008). Estudio del efecto de los acabados superficiales en granitos y calizas para su aplicación en pavimentos exteriores de baldosas de piedra. *Materiales de Construcción*, 289-290 (58): 65-80.

Garland, C.R., Haughton, P., King, R.F. y Moulds, T.P. (1999). Capturing reservoir heterogeneity in a sand-rich submarine fan, Miller Field. In *Petroleum Geology of Northwest Europe: Proceedings of the 5th Conference*, Fleet AJ, Boldy SAR (eds). Geological Society: London: 1199-1208.

Gisbert, J., Aranda, M., Aurell, M., Buj, O., Mateos I., Franco, B., Melendez, A., Pérez, A., Ruiz, F., Navarro, P. y Arranz, E. (2004): *La piedra Natural en Aragón*. Gobierno de Aragón, Departamento de Industria, Comercio y Turismo: 273p.

Gisbert, J., Buj, O. y Franco, B. (2005) Caracterización petrofísica de areniscas del Eoceno medio-superior del Pirineo occidental. *Geogaceta*, 38: 239-242.

Gómez-Heras, M., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M. y Fort, R., (2004). Characterization of changes in matrix of sandstones affected by historical fires. In: D. Kwiatkowski and R. Löfvendahl (Editores), *10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*-Stockholm, 561-568.

Goudi, A.S. (1993): Salt weathering simulation using a single-immersion technique. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 368-376.

Goudie, A.S. y Viles, H.A. (1995). The nature and pattern of debris liberation by salt weathering: a laboratory study. *Earth surface Processes and Landforms*, 20: 437-449.

Goudie, A.S. y Viles, H.A. (1997). *Salt weathering hazard*. Wiley, 256p.

Grimm, W.D. (1999). Beobachtungen und Ueberlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefuegeauflockerung. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 150 (2): 195-235.

Guerrero Montes, M.A. (1990). *Diagnóstico del estado de alteración de la piedra del palacio consistorial de Sevilla*. Universidad de Sevilla. Tesis doctoral, 265p.

Gutt, W. H. (1973). *Conservation of Stone. The Next Steps*, Stone Industries (London).

Hall, K. y Hall, A. (1996). Weathering by wetting and drying: some experimental results. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 365-376.

Hammecker, C. (1995). The importance of the petrophysical properties and external factors in the stone decay in monuments. *Pure and Applied Geophysics* 145 (2): 337-361.

Hatzor, A. y Zor, Y. (1997). Mimram Microtexture effects on microcracking and brittle failure of dolomites Y.H. *Tectonophysics*, 281: 141-161.

Hirschwald, J. (1912). *Handbuch der Bautechnischen Gesteins- prufung*. Berlin: Borntraeger, 642p.

Hirschwald, J. (1908). *Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit*. Ernst & Sonh, Berlin.

Hoke, G. D. y Turcotte, D. L. (2004). The weathering of stones due to dissolution. *Environmental Geology*, 46 (3-4): 305-310.

Honeyborne, D. B. y Harris, P.B. (1958). The structure of porous building stone and its relation to weathering behaviour. In: Everett, D.H, & Stone, F.S. (eds): *Proceedings of the 10th symposium of the Colston research society*. Butterworth Scientific Publications, London. 343-365.

Honjo, S. y Fischer, A.G. (1965). Paleontological investigation of limestones by electron microscope. In: *Handbook of Paleontological Techniques*. Freeman & Co. Eds., San Francisco, 326-334.

Hoshino, K. (1974). Effect of porosity on strength of clastic sedimentary rock. In: *Proceedings of 3rd Congress International Society Rock Mechanics*, Denver, CO, Balkema, Rotterdam, 1: 511-516.

- Howe, J.A. (1910). *The Geology of Building Stones*. Edward Arnold, London. 455p.
- Hrouda, F. (1982). Magnetic anisotropy and its application in geology and geophysics. *Geophysical Survey*, 5: 37-82.
- Hrouda, F. (1986). The effect of quartz on the magnetic susceptibility of quartzite. *Geophysics and Geology*, 30: 39-45.
- Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R.D., Grimm, J.P. y Pickle, J.D. (1984). The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point counting method. *Journal of Sedimentology Petrology*, 54: 103-116.
- Instituto del Patrimonio Histórico Español (IPHE) (2003). *Jornadas sobre criterios de intervención en materiales pétreos. Bienes culturales, Anexo 2*.
- I.S.R.M. (1979): Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties. Swelling and slake-durability index properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16 (2): 143-156.
- Jackson, J.A., (1977). *Glossary of geology*. American Geological Institute, Alexandria, Virginia 769p.
- Jelinek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabric of rocks, *Tectonophysics*, 79: 63-67.
- Jensen, J.L., Glasbey, C.A. y Corbett, P.W.M. (1994). On the interaction of geology, measurement and statistical analysis of small-scale permeability measurements: *Terra Nova*, 6: 397-403.
- Jimenez, I., Hinggin, M. y Scherer, G.W. (2002). Hygric Swelling of Portland Brownstone. *Materials research society. Symposium Proceedings*, 712: 193-200.
- Johannessen, C. L., Freiereisen, J. J. y Wells, A. N. (1982). Weathering of ocean cliffs by salt expansion in a mid-latitude coastal environment. *Shore and Beach*, 50: 26-34.
- Jonson, R. (1984). *Elementary Statistics*. Duxbury Press, Boston, MA, 86-106.
- Jornet, A., Teruzzi, T. y Rück, P. (2002). Bowing of Carrara marble slabs: comparison between natural and artificial weathering. In: Prikryl, R. & Viles, H. A. (eds) *Understanding and Managing Stone Decay*, The Karolinum Press, Prague, 161-169.
- Journel, A.G. y Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press: Orlando 600p.
- Kalimeris, N. y Hall, C. (1983). Absorption and desorption of porous building materials. *Materials science and Restoration*, F. H. Wittman (Ed), Proc. Int. Coll., Edition Lack and Chemie, 57-66p.
- Kaneuji, M. (1978). Correlation between pore size distribution and freeze thaw durability of coarse aggregate in concrete. *Report JHRP-IN-78-15, Joint Highway Research Project, Purdue University*. Reproduced by the National Technical Information Service. US Department of Commerce, Springfield, VA 22161, 142 p.

Kaneuji, M., Winslow, D.N. y Dolch, W.C. (1980). The relationship between an aggregate's pore size and its freeze thaw durability in concrete. *Cement and Concrete Research*, 10: 433-441.

Kieslinger, A. (1930). Das volumen des eises. *Geologie und Bauwesen*, 2, 199-207.

Kossev, N.V. (1970). Correlation between the physical and mechanical properties of rocks and degree of their weathering. *Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rocks Mechanics*, Beograd, 29-35.

Kwaad, F. J. P. M. (1970). Experiments on the granular disintegration of granite by salt action. *Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium*, 16: 67-80.

Laurenzi-Tabasso, M. y Lazzarini, L. (1985). Consolidant and protective effects of different products on Leche limenstone. *Vth. International Congress on Deterioration and Protection of Stone*, Laussane, 2: 697-707.

Litvan, G.G. (1981) Frost action in porous system. *Seminarie "Alteration et Durabilité des Betons et des Pierres"*, 1: 95-108.

Lloyd, C.D., McKinley, J.M. y Ruffell, A.H. (2003). Conditional simulation of sandstone permeability. *Proceedings of IAMG 2003, Portsmouth, UK*. International Association for Mathematical Geology.

López Mesones, F., Escribano, J. y Nieves G. (2001). *Manual para el uso de la piedra en la arquitectura*, 393p.

Mamillan, M. (1981). Connaissances actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs. *The conservation of stone II, Proceedings of the International Symposium, Bologna R. Rossi-Manaresi Ed*, 59-72.

Martin, L., Bello, M.A. y Martin, A. (1992). Acelerated alterations test on the stones used in the cathedral of Granada (Spain). In: Delgado Rodrigues, *et al.*, (Eds). *Proceedings of the 7th International Congress On Deterioration and Conservation of stone*, Lisboa, 2: 845-850.

Mateos, I. (2004). *Metodologías y evaluación de tratamientos de conservación en materiales pétreos del patrimonio aragonés*. Tesis de Licenciatura Universidad Zaragoza. 142p.

Matsuoka, N. (1988). Laboratory experiments on frost shattering of rocks. *Science reports of the institute of geosciences*, University de Tsukuba, Section A 9: 1-36.

McGreevy, J. P. (1985). A preliminary scanning electron microscope study of honeycomb weathering of sandstone in a coastal environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 509-518.

McGreevy, J.P. (1996). Pore properties of limestone as controls on salt weathering susceptibility: a case study. In *Processes of Urban Stone Decay*, Smith BJ, Warke PA (Eds). Donhead Publishing: Shaftesbury, 150-167.

McKinley, J.M., Lloyd, C.D. y Ruffell, A.H. (2004). Use of variography in permeability characterisation of visually homogeneous sandstone reservoirs with examples from outcrop studies. *Mathematical Geology* 36(7): 761-779.

McKinley, J.M., Warke, P.A., Lloyd, C. D., Ruffell, A. H. y Smith, B.J. (2006). Geostatistical analysis in weathering studies: case study for Stanton Moor building sandstone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 950-969.

McKinley, J.M., Warke, P.A. y Curran, J. M. (2006). Application of geostatistical techniques in weathering studies of building stone. *Proceedings of the Heritage, Weathering and Conservation International Conference*, Madrid, 2: 531-536.

McKinley, J. y Warke, P.A. (2007). Controls on permeability implications for stone weathering. In: Prikriil, R. & Smith, B.J. (eds) *Building stone decay: from diagnosis to conservation*. Geological society, London, special publication, 271: 225-236.

McMahon, D. J., Sandberg, P., Folliard, K. y Mehta, P. K. (1992). Deterioration mechanisms of sodium sulfate, in Delgado- Rodrigues, J., Henriques, F. and Jeremias, F. (Eds), *Proceedings of VII International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisbon, LNEC, 2: 705-714.

Meng, B. (1993). Characterization of pore structure for the interpretation of moisture transport. In: Proceedings of the International RILEM-UNESCO, Paris, Yuly, M.J Thiel, Editor, *Conservation of Stone and Other Materials: Research Industry Media*, 155-162.

Mertz, J.D. (1991). Structure de porosité et propriétés de transport dans les grès. *Centre de géochimie de la surface, Strasbourg. Dissertation*, 90: 129p.

Mingarro, F. (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Cursos de verano del Escorial. Editorial Complutense. Madrid, 505p.

Montoto, M. (1983). Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks. *Proceedings of the 5th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, 93-98.

Montoto, M. y Eibert R. (1999). Petrofísica de la roca matriz. *Trabajos de geología*, 21: 239-252.

Moropoulou, A., Bisbikou, K., Torfs, K., Van Grieken, R., Zezza, F. y Macri F. (1988). Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. *Atmospheric Environment*, 32 (6): 967-982.

Morse, J.W. y Arvidson, R.S. (2002). The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. *Earth Science Reviews*, 58: 51-84.

Mottershead, D. N. y Pye, K. (1994). Tafoni on coastal slopes, South Devon, U.K. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19: 543-563.

Navarro, J.V. (2005). Criterios de intervención y evaluación de tratamientos de consolidación. *Curso de Verano Caracterización y restauración de materiales pétreos en arquitectura, escultura y arqueología*. Fundación Uncastillo.

Nicholson, D. (2001). Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 819-838.

Niesel, K. (1983). The weathering behaviour of natural building stone. *Stone industries*, 30-31.

Norma UNE 22-183-85. Mármoles y calizas ornamentales. *Resistencia al desgaste por rozamiento en plataforma giratoria*.

Norma UNE 22-188-85. Mármoles y calizas ornamentales. *Microdureza Knoop*.

Norma UNE 22-189-85. Mármoles y calizas ornamentales. *Resistencia al choque*.

Norma UNE-EN 1926:1999. Métodos de ensayo para la piedra natural. *Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial*.

Norma UNE-EN 12372:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. *Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada*.

Norma UNE-EN 12370:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. *Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales*.

Norma UNE-EN 772-4:1999. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. *Parte 4:- Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total de piezas de piedra natural para fábrica de albañilería*.

Norma UNE-EN 1925:1999. Métodos de ensayo para piedra natural. *Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*.

Norma UNE-EN 12407:2001. Métodos de ensayo para piedra natural. *Estudio petrográfico*.

Norma UNE-EN 1341:2002. *Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo*.

Norma UNE-EN 772-1:2002. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. *Parte 1:- Determinación de la resistencia a compresión*.

Norma UNE-EN 13755:2002. Métodos de ensayo para piedra natural. *Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica*.

Norma UNE-EN 13373:2003. Métodos de ensayo para piedra natural. *Determinación de las características geométricas de las unidades*.

Norma UNE 22950-2:2003. *Resistencia a la tracción. Determinación indirecta (Ensayo Brasileño)*.

Norma UNE-EN 12670:2003. *Piedra Natural. Terminología*.

Norma UNE-EN 14146:2004. Métodos de ensayo para piedra natural: *Determinación del módulo de elasticidad dinámico*.

Norma UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. *Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*.

Olsson, W.A. (1974). Grain size dependence of yield stress in marble. *Journal of Geophysical Research*. 79: 4859-4862.

Ordóñez, S. (1996). Petrofísica: aspectos generales. *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Cursos de Verano del Escorial*. Editorial Complutense, 193-211.

Ordoñez, S., Fort R. y García del Cura M.A. (1997). Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 30: 221-230.

Ownens, W.H. y Rutter, E.H. (1978). The development of magnetic susceptibility anisotropy through crystallographic preferred orientation in a calcite rock. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 16: 215-222.

Palchik, V. y Hatzor, Y.H. (2002). Crack damage stress as a composite function of porosity and elastic matrix stiffness in dolomites and limestones. *Engineering Geology*, 63: 233-245.

Pardo, G. (2004). La Cuenca del Ebro. En *Geología de España*. Editor Vera, 6.2: 533-543.

Pebesma, E.J. y Wesseling, C.G. (1998). Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences*, 24: 17-31.

Pellegrin, F.M. (1980). La porosimetría au mercure aplicues à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bulletin des Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 106: 105-116.

Peña Monné, J.L. (1995). *Atlas de Geografía de Aragón*. Instituto Fernando el católico, Caja de ahorros de la Inmaculada.1.1.1 Mapa geológico.

Pera, E. y Burlini, L. (2002). Elastic properties of selected Italian marbles. In: Prikryl, R. & Viles, H. A. (eds) *Understanding and Managing Stone Decay*, The Karolinum Press, Prague, 171-182.

Pernia, J. M., Fresno, F., Mena, J.M., Lucena, A. y Lechosa, R. (1986). Registro de datos en sondeos de reconocimiento. Ed. IGME, 144 p.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R. (1987). *Sand and sandstone*. Springer Verlag. New Cork. 553 p.

Pittman, E.D. y Duschatko, R.W. (1970). Use of pore casts and scanning electron microscope to study pore geometry. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40: 1153-1157.

Poschlod, K. (1990). Das Washer im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung. *Muencher Geowissenschaftliche Abhandlungen*, 7: 1-62.

Prendes, N. (1992). *Aplicaciones del análisis digital de imágenes*. Monografías centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX). M-27 154p.

Price, C.A. (1996): *Stone Conservation: An Overview of Current research*. Getty Institute, Santa Monica, 88 p.

Price, C. A. (1978). The use of sodium sulphate crystallization test for determining the weathering resistance of untreated stone, UNESCO/Rilem. *International Symposium Deterioration and Protection of Stone Monuments*, Reilure, Paris, 3.6, 23p.

Prikryl, R. y Dudková, I. (2002). Experience with long term experimental exposure of building stones: a 70 years study in the Czech Republic. In: Prikryl, R. & Viles, H. A. (eds) *Understanding and Managing Stone Decay*, The Karolinum Press, Prague, 135-143.

Prosser, D.J. y Carter, R.R. (1997). Permeability heterogeneity within the Jerudong Formation: an outcrop analogue for subsurface Miocene reservoirs in Brunei. In *Petroleum Geology of Southeast Asia*, Frasier AJ, Matthews SJ, Murphy RW (eds). Special Publication 126. Geological Society: London: 195-235.

Prosser, D.J., McKeever, M., Hogg, A.J.C. y Hurst, A. (1995). Permeability heterogeneity within massive Jurassic submarine fan sandstones from the Miller Field, northern North Sea, UK. In *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*, Hartley AJ, Prosser DJ (eds). Special Publication 94. Geological Society: London; 201-219.

Puigdefábregas, T. (1975). *La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca*. Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos 104.

Pühringer, J., Berntsson, L. y Hedberg B. (1985). Hydrate salts and degradation of materials. In: *Proceedings of the 5th International Congress on Deterioration and conservation of stone*, Lausanne, 231-240.

Putnis, A. y Mauthe, G. (2001). The effect of pore size on cementation in porous rocks. *Geofluids*, 1: 37-41.

Punuru, A.R., Chowdhury, A.N., Kulsheshta, N.P. y Gauri, K.L. (1990). Control of porosity on durability of limestones at the Great Sphinx, Egipt. *Environmental Geology Water Science*, 15: 225-232.

Pusch, R. (1995). *Rock mechanics on a geological base*. Elsevier Amsterdam. 498p.

Quitantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los monegros*. Institución Fernando el Católico. CSIC Zaragoza 207p.

Rathgen, F. y Borroman, R. (1915). Über Versuche mit Steinerhaltungsmitteln: III. Mitteilung, *Zeitschrift für Bauwesen* 65: 221-252.

Regueiro y González-Barros, M. y Quereda, R. (1994). La piedra de cantería en España. II : Comunidades de Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco y Navarra. *Boletín geológico y minero*. 105 (4): 56-66.

Regueiro y González-Barros, M. (2007). *Normativa técnica de piedra natural*. http://www.ue-inti.gov.ar/pdf/normativa_tcnica_de_piedra_natural.pdf.

Riganti, V., Perotti, A., Fiumara, A., Veniale, F. y Zezza, U. (1981). Applicazione di tecniche strumentali al controllo del degrado delle pietre nei monumenti: il caso Della Basilica de S. Michele in Pavia. *Museo Civico Storia Naturale*, Milano, 122: 109-138.

Ritter, H.L. y Drake, L.C. (1945). Pore-size distribution in porous material, pressure porosimeter and determination of complete macropore-size distribution. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, 17: 782-786.

Riba, O., Reguant, S. y Villena, J. (1983). Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. En: *Geología de España*. Libro jubilar J.M. Ríos, Tomo II, 131-160.

Rivas, T., Silva, B. y Prieto, B. (1998). Medida de durabilidad de los tratamientos de hidrofugación aplicados a rocas graníticas. *Materiales de Construcción*, 250: 5-14.

Robson, H.L. (1927). The system $MgSO_4-H_2O$ from 68 to 240. *Journal of the American Chemical Society*, 49: 2772-2783.

Rodríguez-Navarro, C. y Sebastián, E. (1994). Técnicas de análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ingeniería civil*, 96: 130-142.

Rodríguez-Navarro, C. y Dohene, E. (1999). Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallisation pattern. *Earth surface Processes and Landforms*, 24: 191-209.

Russel, S.A. (1927). *Stone preservation commite report* (Appendix I). H.M. Stationary Office, London.

Russell, M. I., Basheer, P. A. M., Harmon, N. y Curran, J. M. (2002). Permeation properties of building stone: The Autoclam Permeability System. In: Prikryl, R. & Viles, H. A. (eds) *Understanding and Managing Stone Decay*, The Karolinum Press, Prague, 75-84.

Ruedrich, J., Kirchner, D., Seidel, M. y Siegesmund, S. (2005). Deterioration of natural building stones induced by salt and ice crystallisation in the pore space as well as hygric expansion processes. In: Siegesmund S, Auras M, Ruedrich J, Snethlage R (eds) *Geowissenschaften und Denkmalpflege, Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft* 156/1: 59-73.

Ruedrich J. y Siegesmund S. (2006). Fabric dependence of length change behaviour induced by ice crystallisation in the pore space of natural building stone. *Heritage Weathering Conservation*, I: 497-505.

Ruedrich, J. y Siegesmund, S. (2007). Length changes of sandstones caused by salt crystallization. *Building Stone Decay. From diagnosis to conservation*, 199-209.

Sayed, A.M.I., Fayed, L. y Ibrahim, H. (1999). Geotechnical properties of some limestones of the Nile Valley, Egypt, Kuwait. *Journal of Science and Engineering*, 26 (1): 181-195.

Schaffer, R.J., (1932). *The weathering of natural building stones*. Building Research Establishment, Watford, 149 p.

Scherer, G.W. (1999). Crystallisation in pores. *Cement and concrete Research*, 29: 1347-1358.

Sebastián Pardo, E., Zezza, U., De la Torre, M., Rodríguez Navarro, C. y Cardell, C. (1992). La "Piedra Franca" biocalcarerita en la construcción de edificios históricos de Granada. *I Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*, I: 329-336.

Sebastián Pardo, E., Zezza, U. y Martín Clabo, J. (1995). The "Piedra Dorada" calcarenite in the cultural built heritage of Baeza (Andalusian province of Jaén, Spain). *Atti Ticinensi di Scienze della Terra*, 205-213.

Shadmon, A. (1993). Dimension stone. Its impact on environment and constructional applications. The role of Engineering geology. *Bulletin of the international Association of Engineering geology*, 48: 119-122.

Shakoor, A. y Bonelli, R.E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* XXVIII-1: 55- 71.

Siegesmund, S. (1996). The significance of rock fabrics for the geological interpretation of geophysical anisotropies. *Geotektonische Forschungen*, 85: 1-123.

Simão, J., Ruiz-Agudo, E. y Rodríguez-Navarro C. (2006). Effects of particulate matter from gasoline and diesel vehicle exhaust emissions on silicate stones sulfation. *Atmospheric Environment*, 40 (36): 6905-6917.

Smith, B.J. y McAlister, J.J. (1986). Observations on the occurrence and origins of salt weathering phenomena near Lake Magadi, southern Kenya. *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 30: 445-460.

Smith, B.J. y McGreevy, J.P. (1988). Contour scaling of a sandstone by salt weathering under simulated hot desert conditions. *Earth surface Processes and Landforms*, 13: 697-706.

Smith, B.J., Warke, P.A., McGreevy, J.P. y Kane, H.L. (2005). Salt weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetuators of preconceptions. *Geomorphology* 67: 211-227.

Snethlage, R. y Wendler, E. (1997). Moisture cycles and sandstone degradation. In: *Saving our architectural heritage*. Edited by: N.S. Baer and R. Snethlage 1997. Chichester: Elsevier. 7-24.

Smorodinov, M.I., Motovilov, E.A. y Volkov V.A. (1970). Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks. *Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Beograd, 3.6: 35-37.

Sperling, C. B. y Cooke, R. V. (1985). Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 541-555.

Steiger, M. y Dannecker, W. (1998). Die Bedingungen für die Kristallisation verschiedener Salzhydrate am Beispiel Thenardit/Mirabilit. In: *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, pp 123-133.

Steve, J., Chipera, D. y Vaniman, T. (2006). Experimental stability of magnesium sulfate hydrates that may be present on Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 241-250.

Tarling, D.H. y Hrouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*, Chapman & Halls eds., London, 217p.

Teixell, A. (1996). The Anso transect of the southern Pyrenees: Basement and cover thrust geometries. *Journal of the Geological Society* (London).153: 301-310.

Török, A. (2006). Influence of fabric on the physical properties of limestones S.K. Kourkoulis (ed.), *Fracture and Failure of Natural Building Stones*, Springer. 487-495.

Torraca, G. (1976). Treatment of stone in monuments a review of principles and progress. *The Conservation of Stone. Paer III International Symposium*. Bologna. 297-315.

- Torraca, G. (1975). *Solubility and Solvents*. Roma: ICCROM.
- Torraca, G. (1982). Porous building materials: Materials science for architectural conservation. *International Center for the Study of the preservation and Restoration of Cultural Property*, ICCROM, Roma, 141p.
- Torraca, G. (1986). Momento nella storia della conservation del marmo. Metodi e attitudini in varie epoche. *OPD Restauro-Restauro del Marmo/ Opere e Problema*, Opus Libri Ed., Firenze 32-45.
- Tugrul, A. y Zarif, I.H. (2000). Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 (3): 191-206.
- Ulusay, R., Tureli, K. y Ider, M.H. (1994). Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*, 37: 135- 157.
- Valdeon, L. (1989). *Comportamiento hídrico de dolomías, calizas y areniscas de las catedrales de León, Sevilla y Salamanca. Aplicabilidad a la conservación de rocas monumentales*. Tesis doctoral.
- Vaniman, D. T., Bish, D. L., Chipera, S. J., Fialips, C. I., Carey, J. y Feldman, W.C. (2004). Magnesium sulphate salts and the history of water on Mars. *Nature*, 431, (7009), 663-665.
- Vera, J.A. (2004). Cordilleras Ibérica y Costero-Catalana. En: *Geología de España*. Instituto geológico y Minero de España. Sociedad Geológica Española, 467-470.
- Vernik, L., Bruno, M. y Bovberg, C. (1993). Empirical relations between compressive strength and porosity of siliclastic rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 30 (7): 677-680.
- Vos, B.H. y Tammes, E. (1969). *Moisture and moisture transfer in porous materials*. Report no. BI-69-96.
- Vos, B. H. (1976). Water absorption and drying of materials. The conservation of stone I, *Proceeding of the International Symposium*, Bologna, R. Rossi-Manaresi (Ed), 679-694.
- Vos, B. H. (1978). Hygric methods for the determination of the behaviour of stones. *Proceeding of the International Symposium on deterioration and Protection of Stone Monuments*, Paris, 3.8 19p.
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D. y Saluja, S.S. (1974). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, vol. 1. Trans Tech Publications Clausthal, Germany. 280p.
- Walter, F. (1903). *Zur Bekämpfung der Mauerfeuchtigkeit*, Zeitschrift del Österreichischer Ingenieur-und Architekten-Verein 55: 666.
- Washburn, E.W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore size in a porous material. *Proceedings of the Natural Academy of Sciences*. US, 7: 115-116.
- Warke, P. A., McKinley, J. y Smith, B. J. (2006). Variable weathering response in sandstone: factors controlling decay sequences. *Earth Surface Processes and Landform*, 31: 715-735.

Watson, J. (1911). *British and foreign building stones: a descriptive catalogue of the specimens in the Sedgwick Museum*, Cambridge.

Wendler, E., Charola, A.E. y Fitzner, B. (1996) Easter Island tuff: Laboratory studies for its consolidation. In *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, ed J. Riederer. Berlin, Germany, 2: 1159-1170.

Weiss, T., Rasollfosaon, P.N.J. y Siegesmund, S. (2002). Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marble. *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Edited by Siegesmund S, Weiss, T and Vollberch, 149-164.

Wellman, H. W. y Wilson, A. T. (1965). Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. *Nature*, 205: 1097-1098.

Wellman, H. W. y Wilson, A. T. (1968). Salt weathering or fretting, in Fairbridge, R. W. (Ed.). *The Encyclopedia of Geomorphology*, Stroudsburg, Pennsylvania, 968-970.

Weyl, P.K. (1959). Pressure solution and the force of crystallisation. A phenomenological theory. *Journal of Geophysical Research*, 64: 2001-2025.

Winkler, E.M. y Wilhelm, E.J. (1970). Salt Brust by Hydration Pressures in Architectural Stone in Urban Atmosphere. *Geological Society of American Bulletin*, 81: 567-572.

Winkler, E.M. y Singer, P.C. (1972). Crystallization pressure of salt in stone and concrete. *Geological Society of American Bulletin*, 83: 3509-3513.

Winkler, E.M. (1975). *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*, Springer, New York, 230p.

Winkler, E.M. (1987). Weathering and weathering rates of natural stone. *Environmental Geology and Water Sciences*, 9(1): 85-92.

Winkler, E.M. (1997). *Stone in Architecture. Properties and durability*. Springer-Verlag, Berlin, 313pp.

Wong, T.F., David, C. y Zhu, W. (1996). The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: mechanical deformation. *Journal of Geophysical Research*, 102: 3009-3025.

Worden, R.H. (1998). Dolomite cement distribution in a sandstone from core and wireline data: the Triassic fluvial Chaunoy Formation, Paris Basin. In *Core-Log Integration*, Harvey PK, Lovell MA (eds). Special Publication 136. Geological Society: London 197-211.

Wright, V. P. (1992). A revised classification of limestones. *Sedimentary geology*, 76 (3-4): 177-185.

Young, A. R. M. (1987). Salt as an agent in the development of cavernous weathering. *Geology*, 15: 962-966.

Zappia, G., Sabbioni, C. y Sauri, M. G. (1992). Damage induced by atmospheric aerosol on ancient and modern building materials. *Journal of Aerosol Science*, 23: 917-920.

Zorlu, K., Ulusay, R., Ocakoglu, F., Gokceoglu, C. y Sonmez, H. (2004). Predicting intact rock properties of selected sandstones using petrographic thin-section data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (1): 93-98.

ANEXOS

ANEXO 1

Ensayos hídricos de absorción y desorción automatizados y porosimetría de inyección de mercurio.

En este anexo se recogen las gráficas de absorción y desorción automatizadas junto con los histogramas de distribución de tamaños de acceso de poro calculados mediante porosimetría de inyección de mercurio para cada una de las dieciocho rocas caracterizadas.

En las curvas de absorción libre de agua se ha representado en abscisas el tiempo expresado como raíz cuadrada del tiempo en segundos y en ordenadas el contenido en humedad expresado como porcentaje respecto de la masa seca de la probeta.

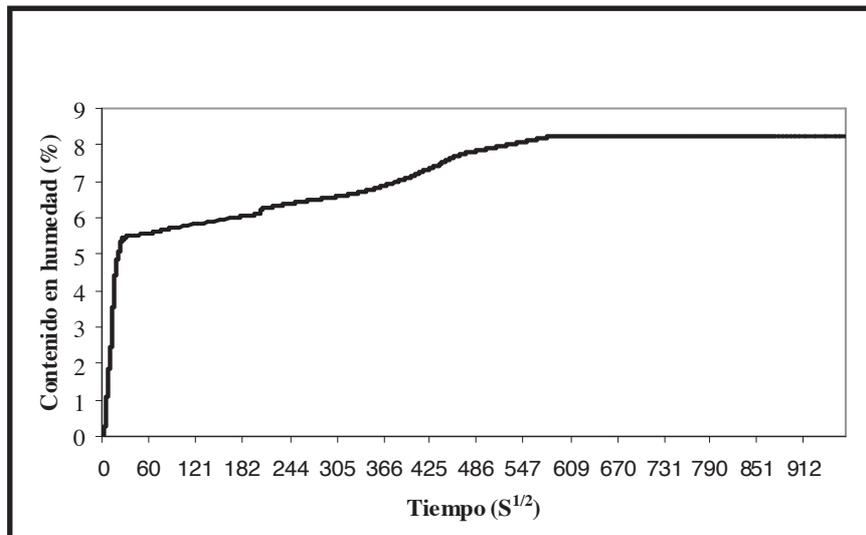
En las curvas de evaporación se ha representado en abscisas el tiempo expresado en horas y en ordenadas el contenido en humedad.

En los histogramas de distribución de tamaños de acceso de poro se ha representado en abscisas el tamaño de acceso de poro en micras y en ordenadas la frecuencia.

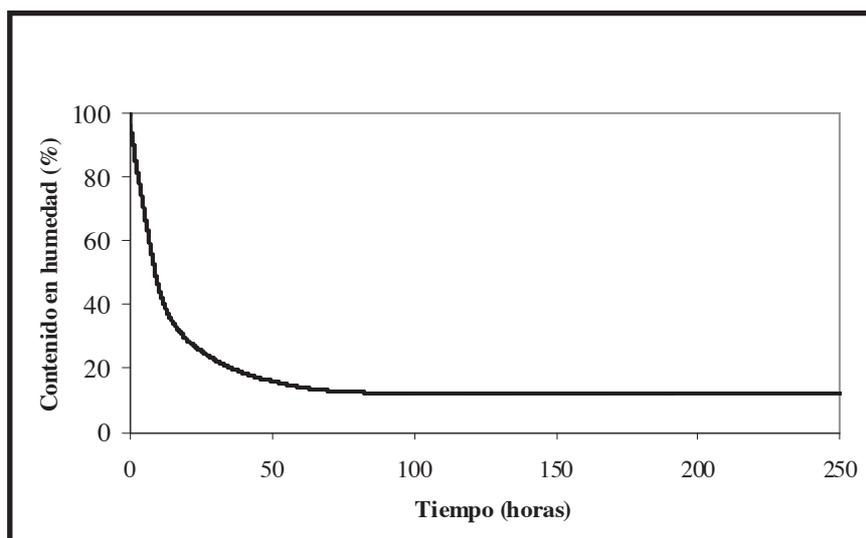
En las rocas 17-CFS, 18-VI-II y 27-Tr no se ha podido realizar la porosimetría de inyección de mercurio debido a que sus macroporos imposibilitan la realización del ensayo.

Sigla:6-Un

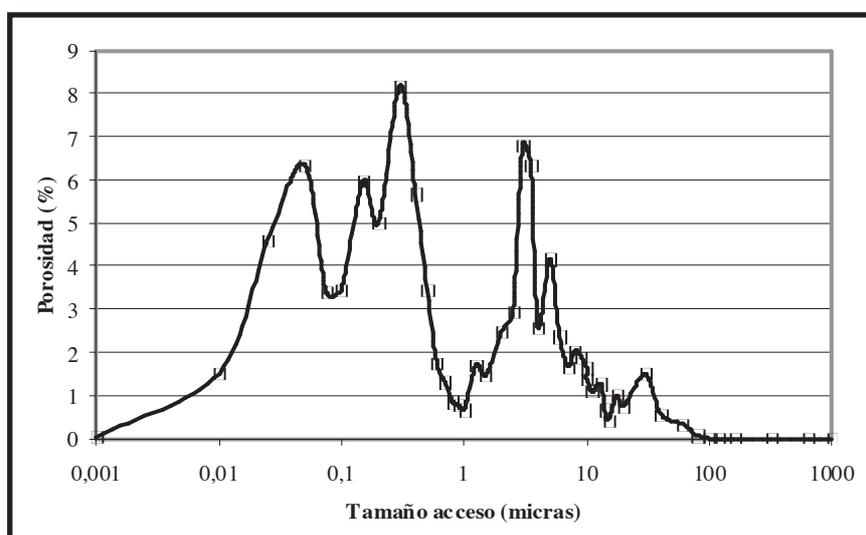
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

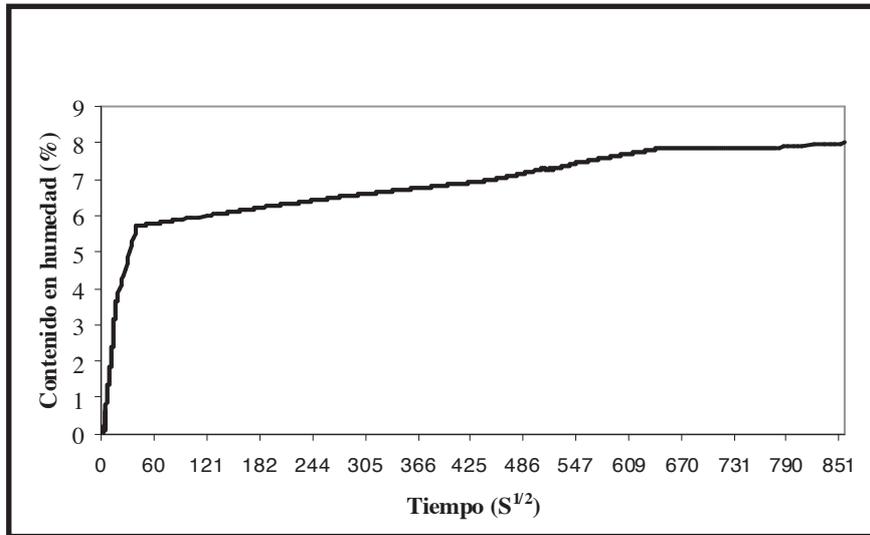


Distribución de tamaños de acceso de poro.

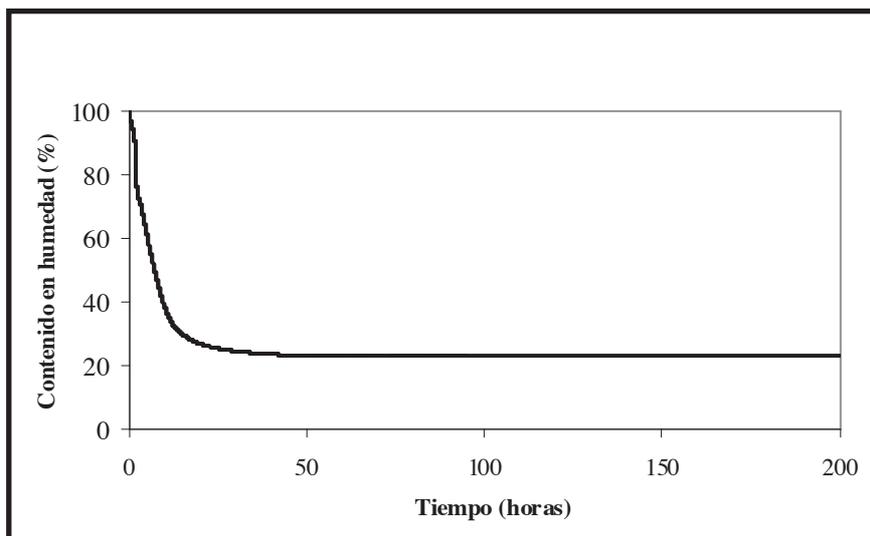


Sigla:7-Ay

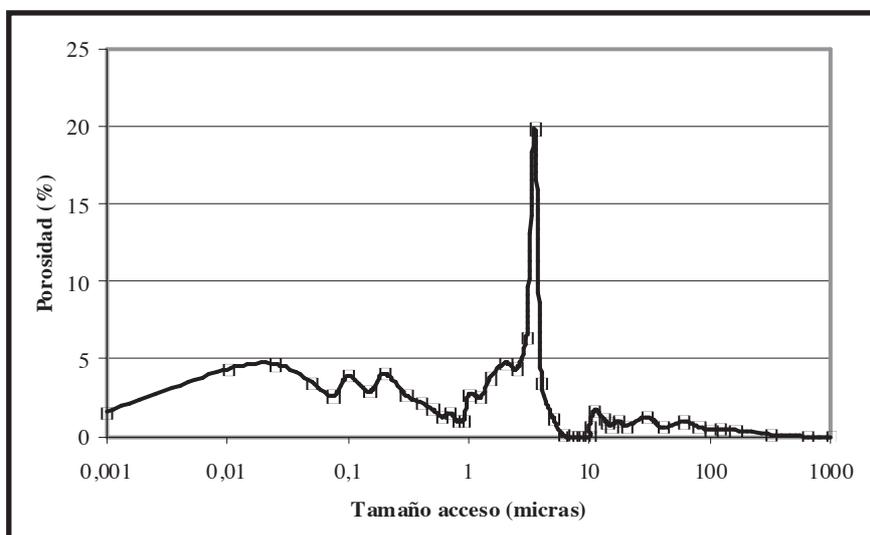
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

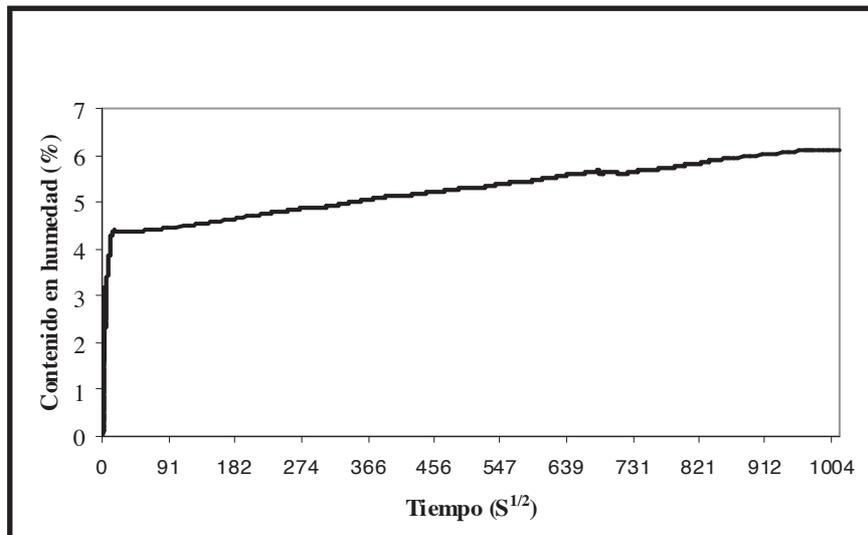


Distribución de tamaños de acceso de poro.

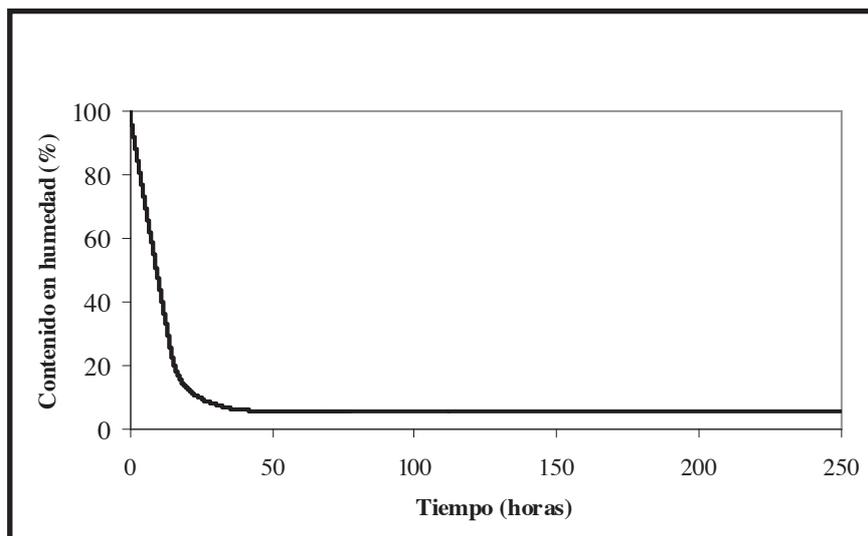


Sigla:10-Az

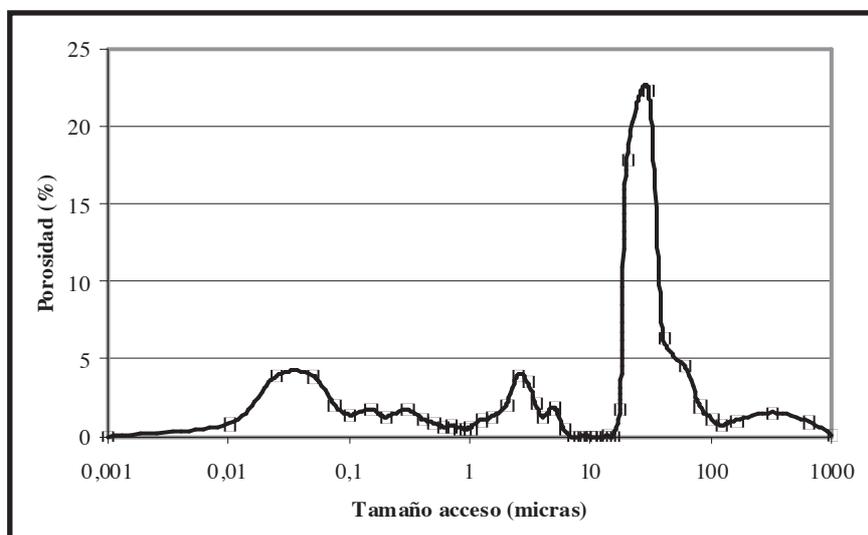
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

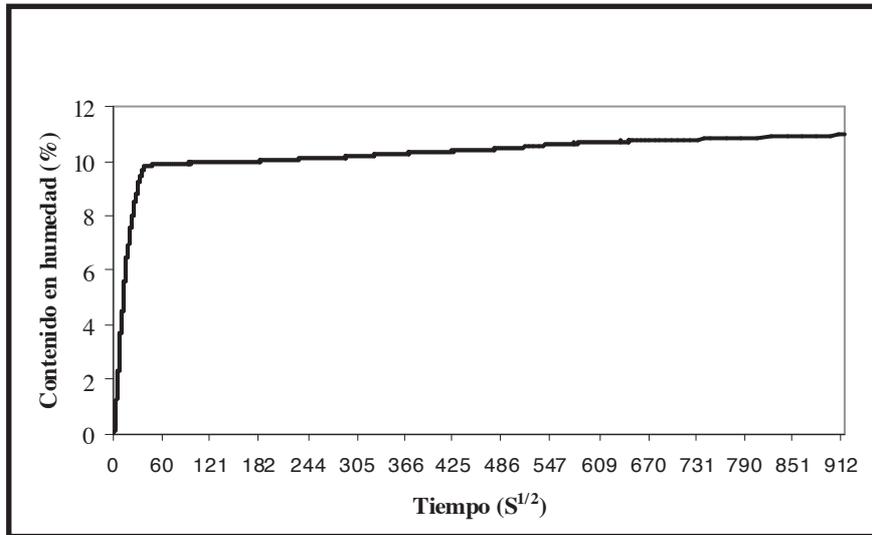


Distribución de tamaños de acceso de poro.

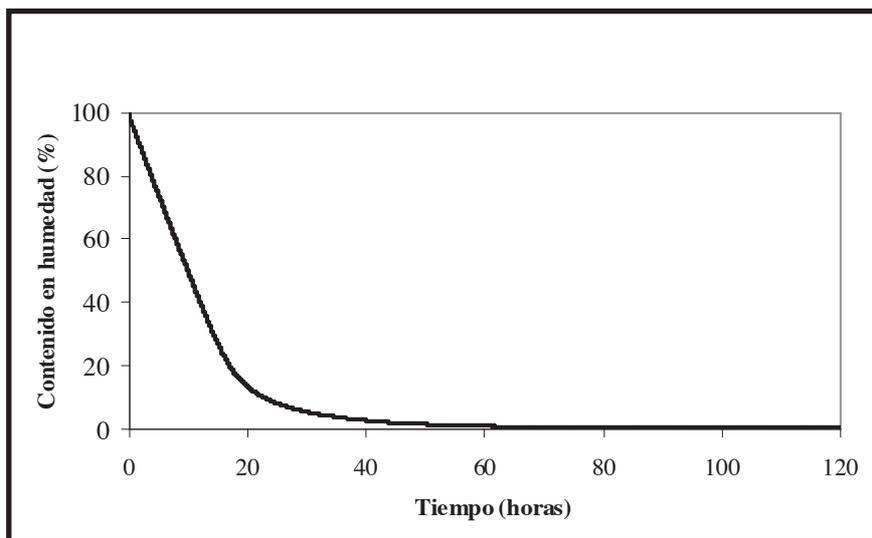


Sigla:8-Tu

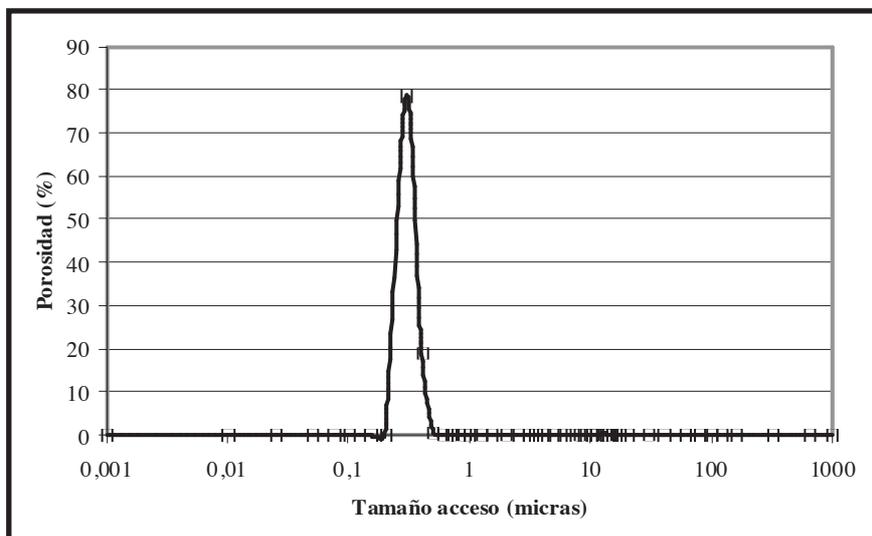
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

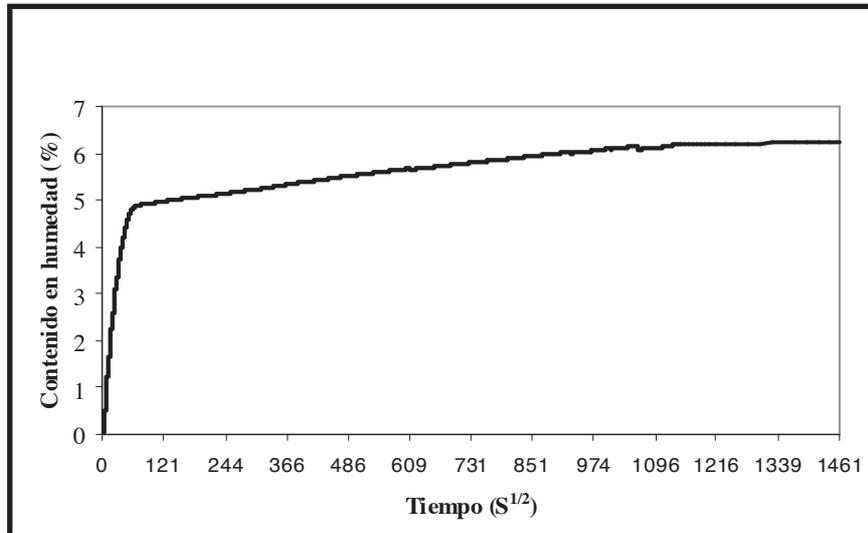


Distribución de tamaños de acceso de poro.

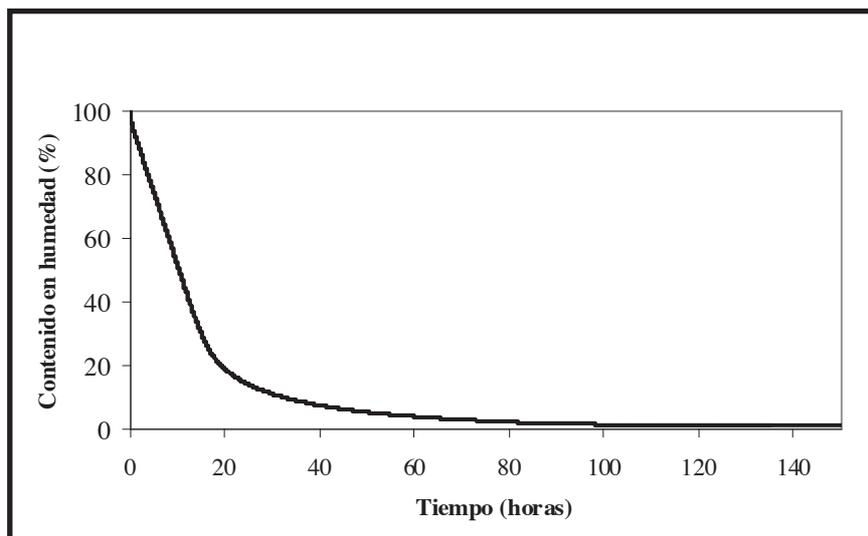


Sigla: 9-Fr

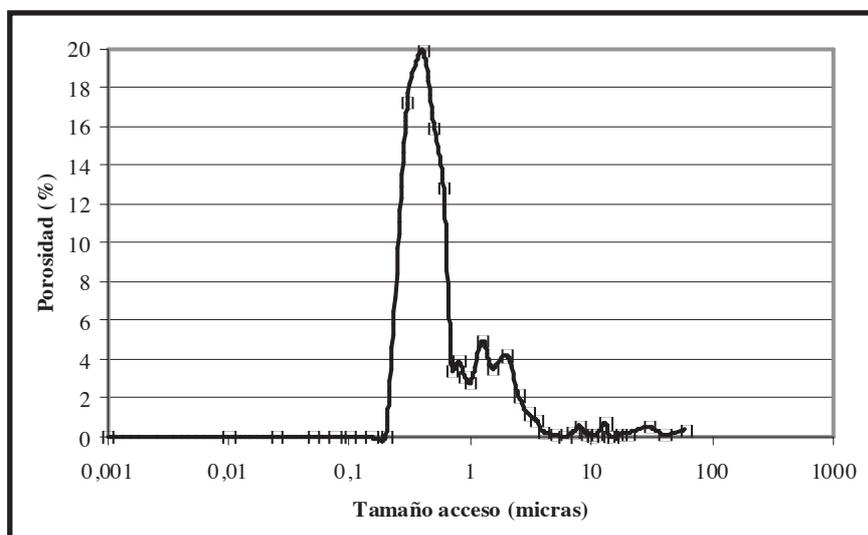
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

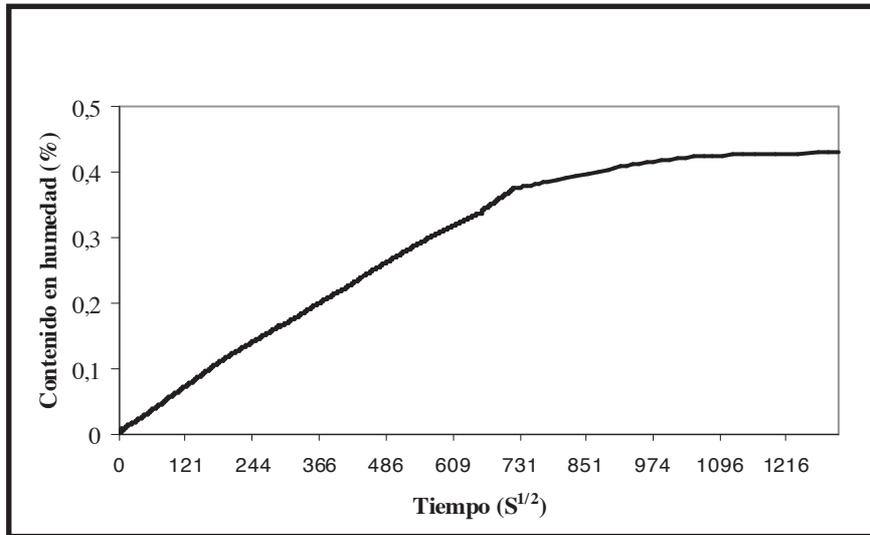


Distribución de tamaños de acceso de poro.

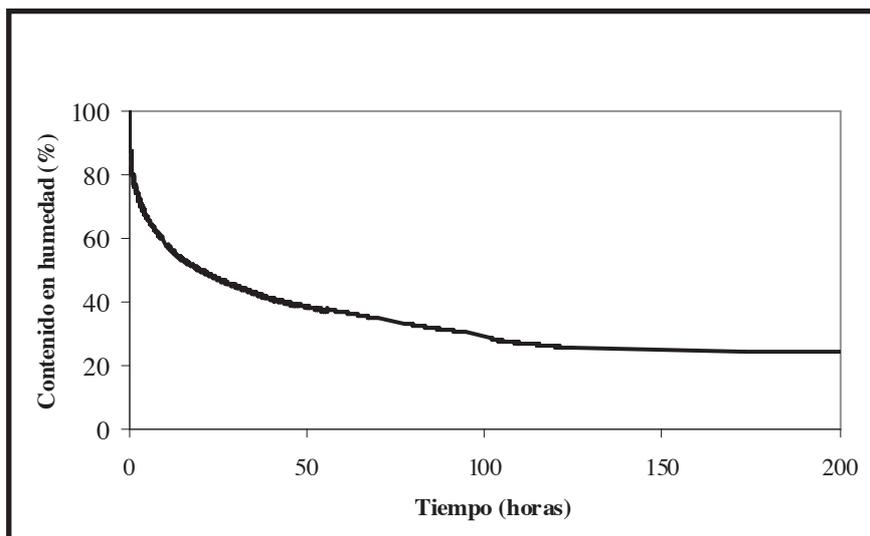


Sigla: 12-Ca

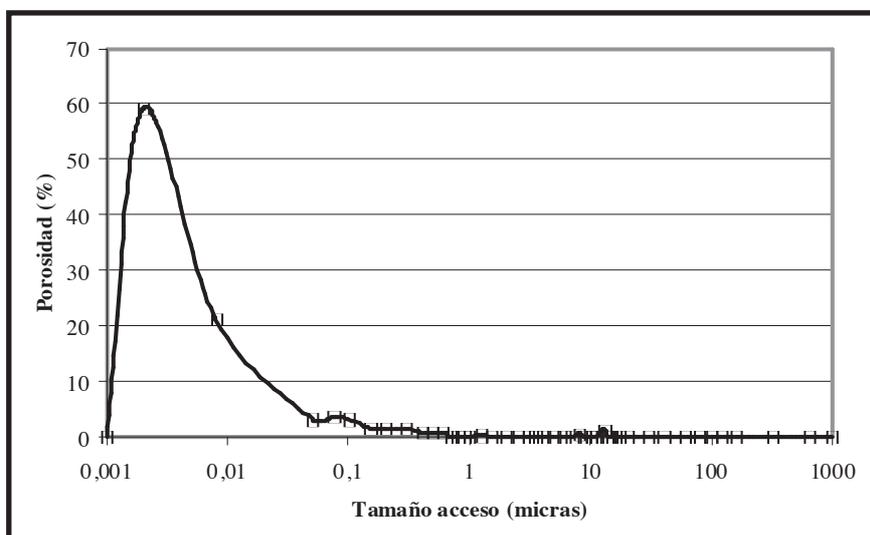
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

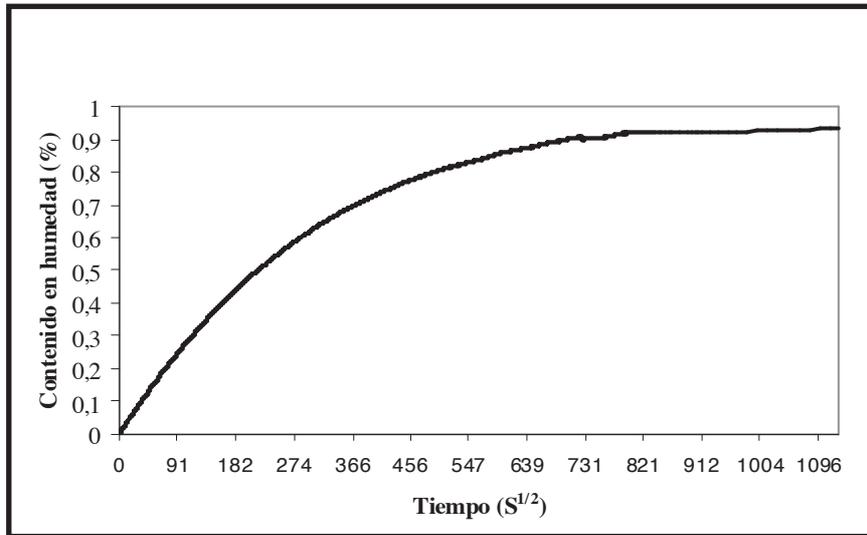


Distribución de tamaños de acceso de poro.

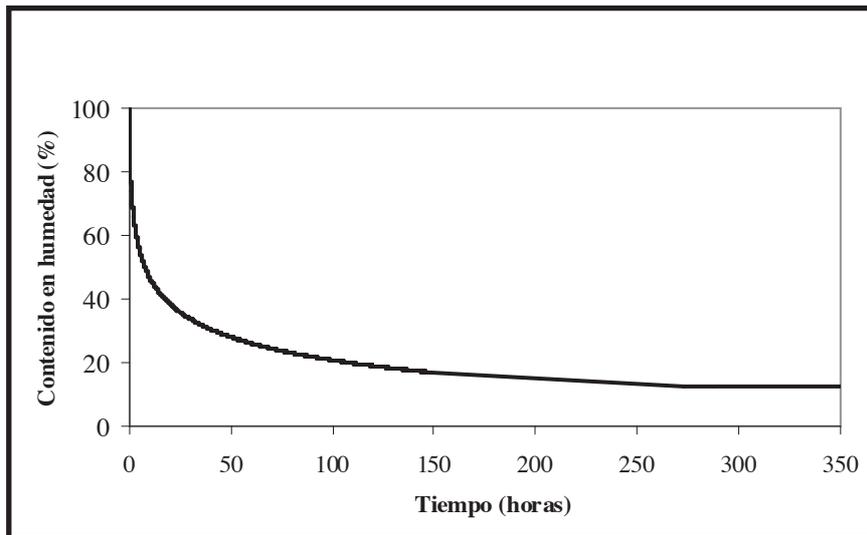


Sigla:13-Pu

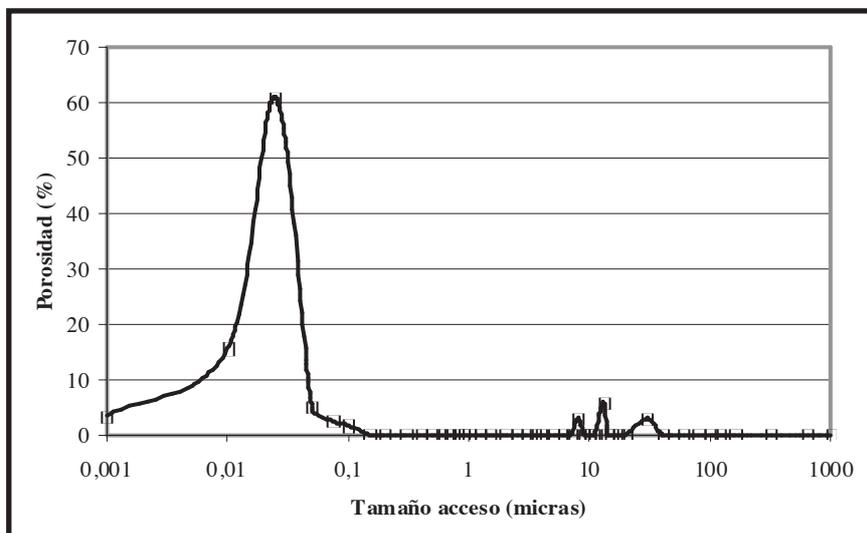
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

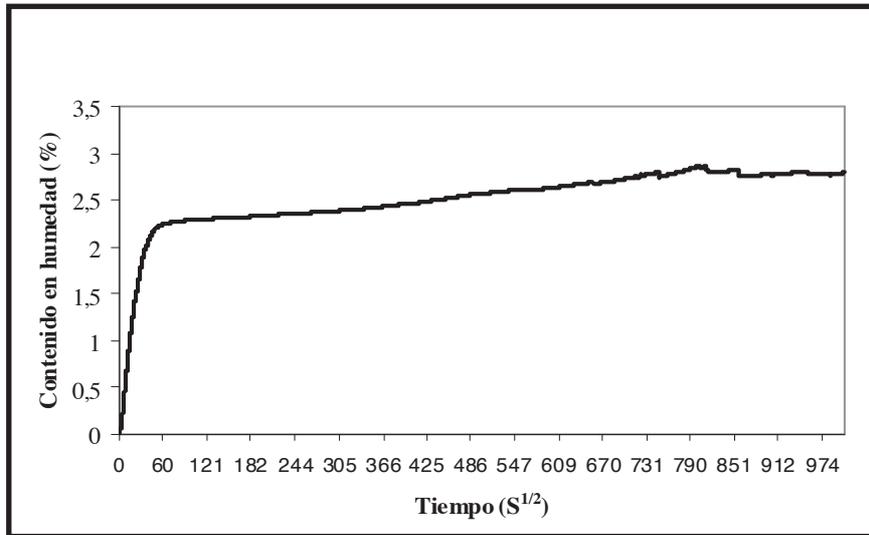


Distribución de tamaños de acceso de poro.

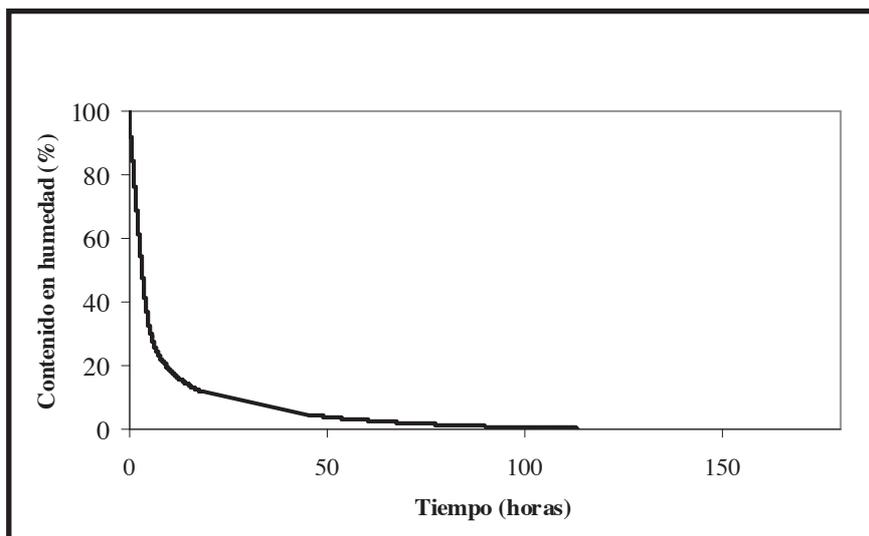


Sigla: 16-VI-I

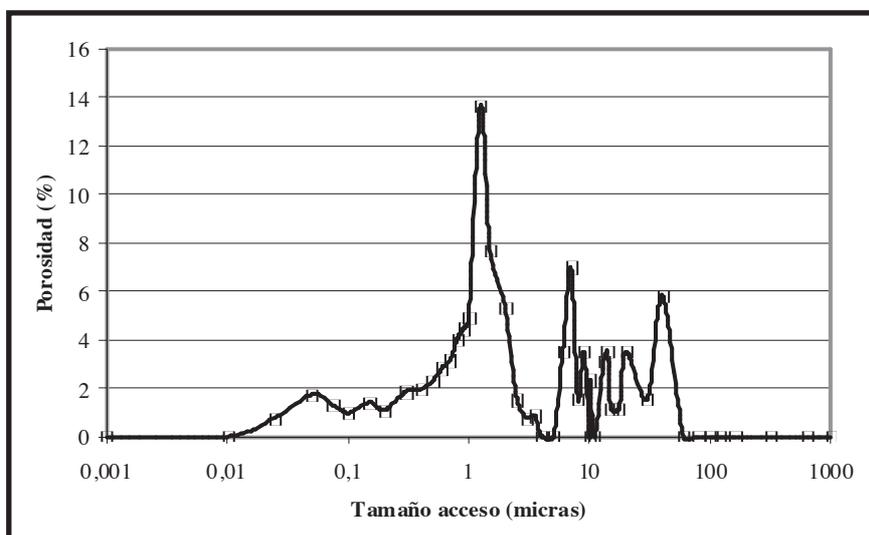
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

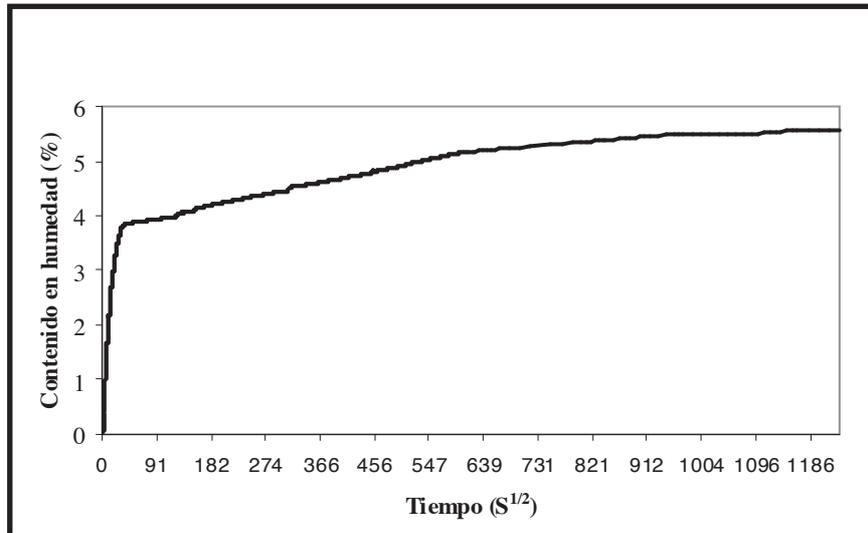


Distribución de tamaños de acceso de poro.

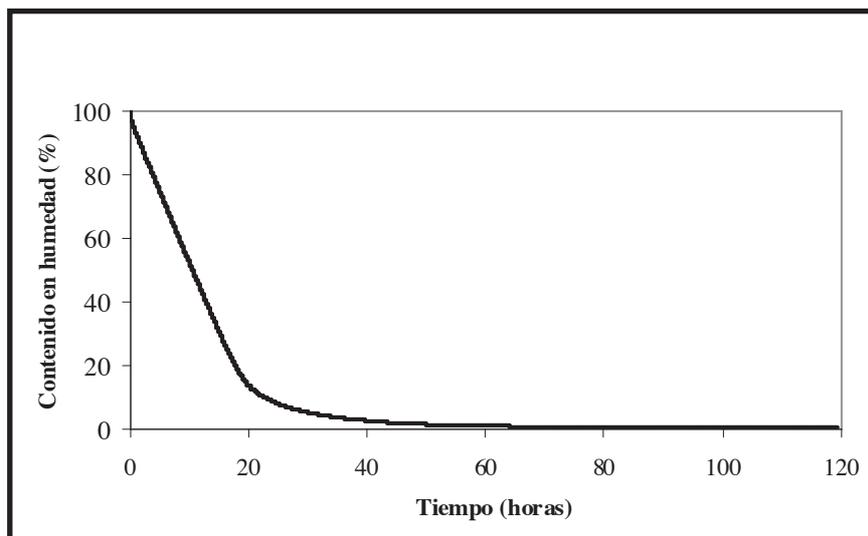


Sigla: 17-CFI

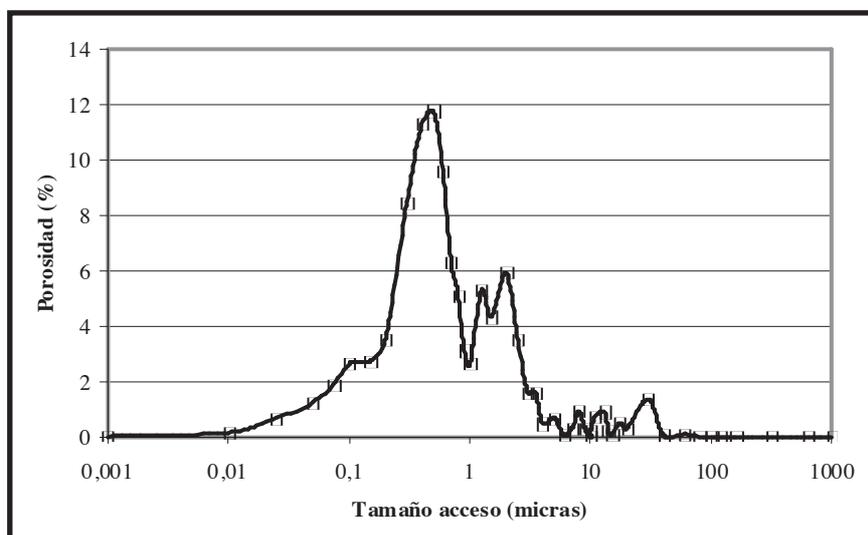
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

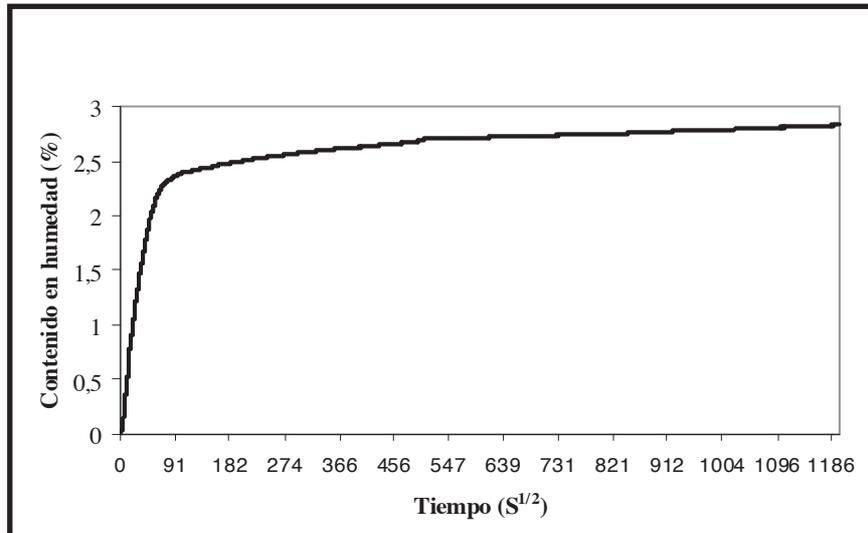


Distribución de tamaños de acceso de poro.

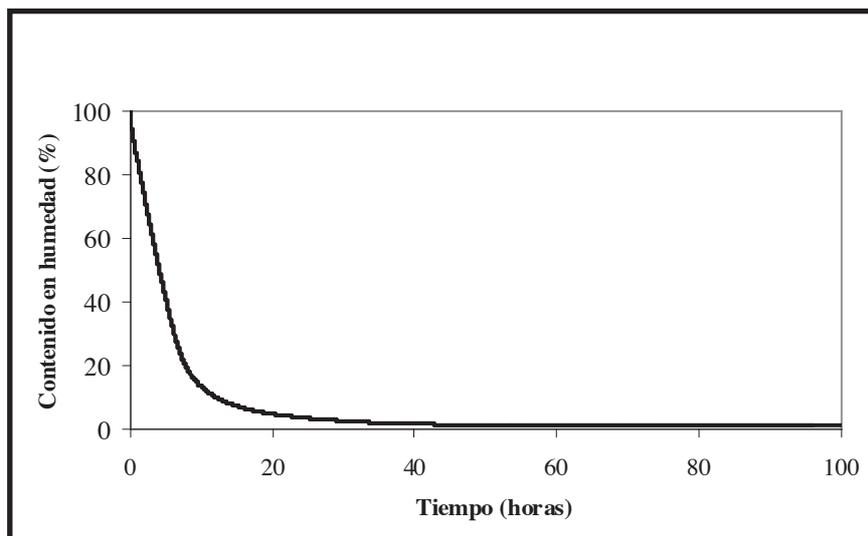


Sigla:17-CFS

Curva de absorción libre de agua.

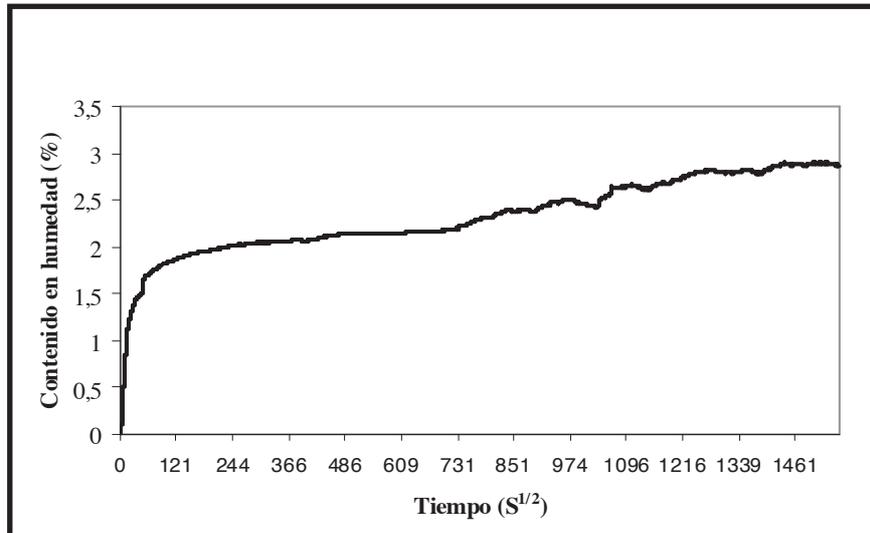


Curva de evaporación.

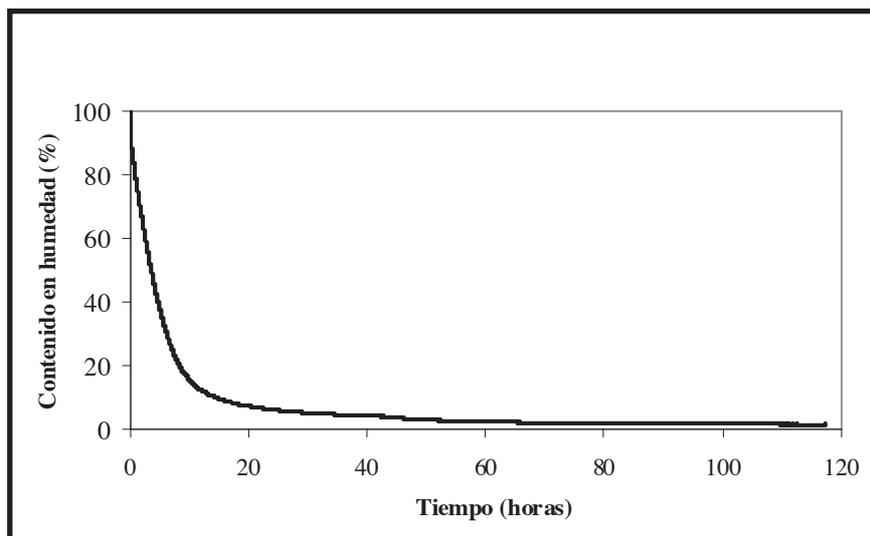


Sigla:18-VI-II

Curva de absorción libre de agua.

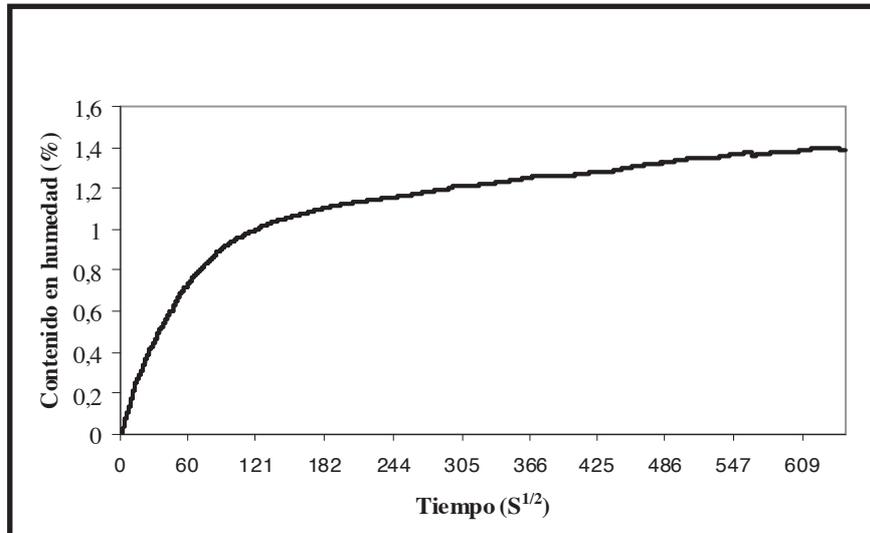


Curva de evaporación.

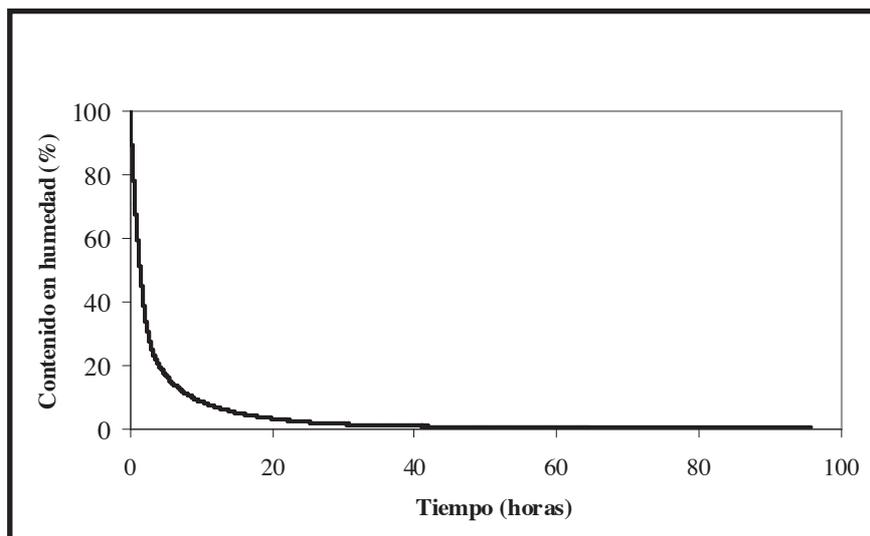


Sigla: 27-Tr

Curva de absorción libre de agua.

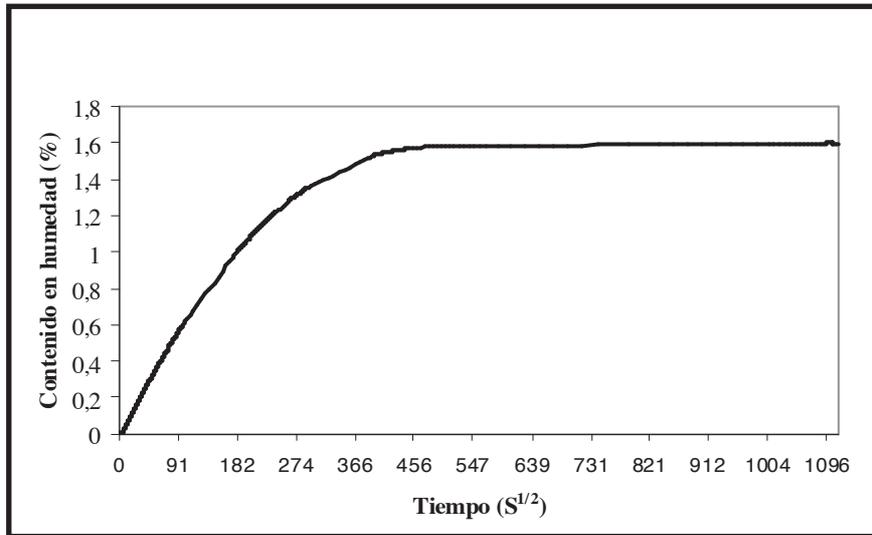


Curva de evaporación.

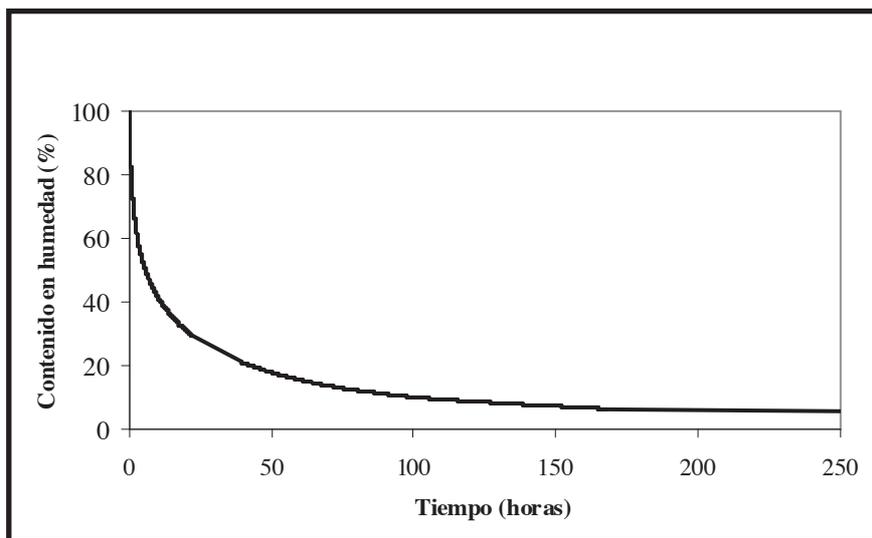


Sigla: 28-Crt

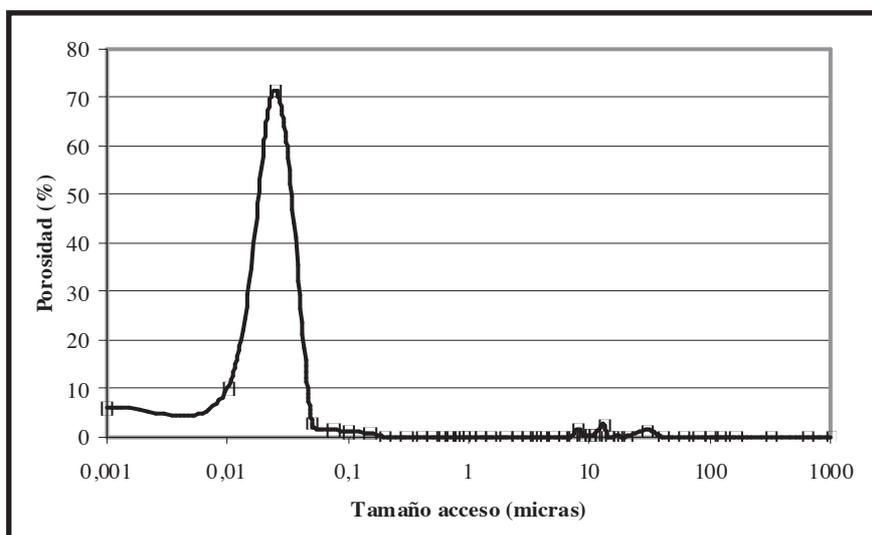
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

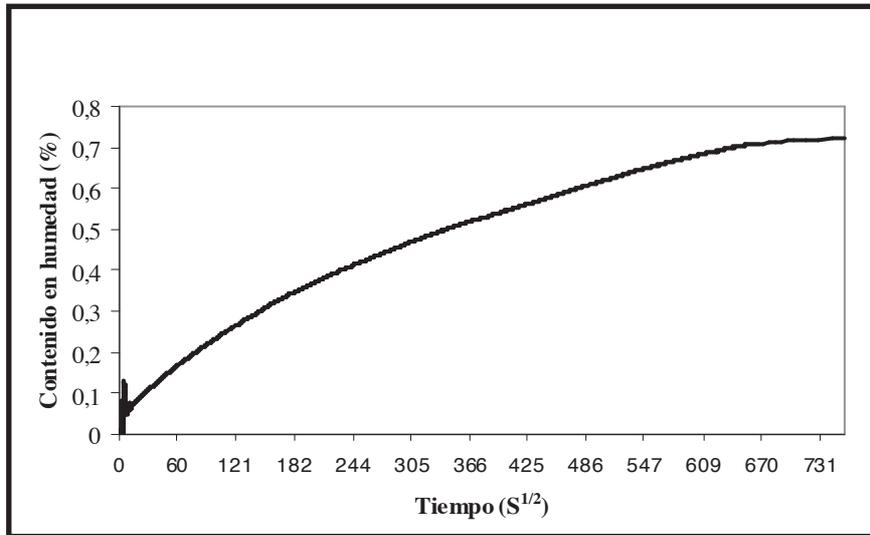


Distribución de tamaños de acceso de poro.

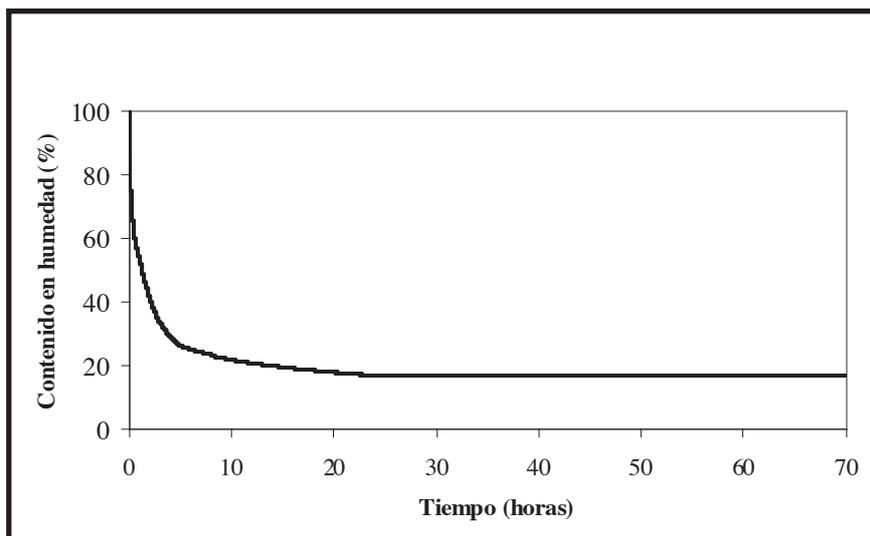


Sigla: 29-A

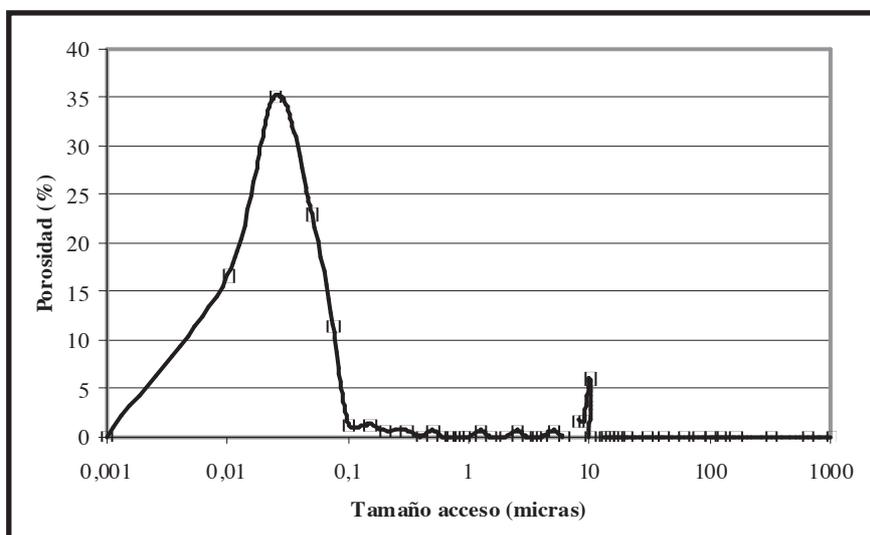
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

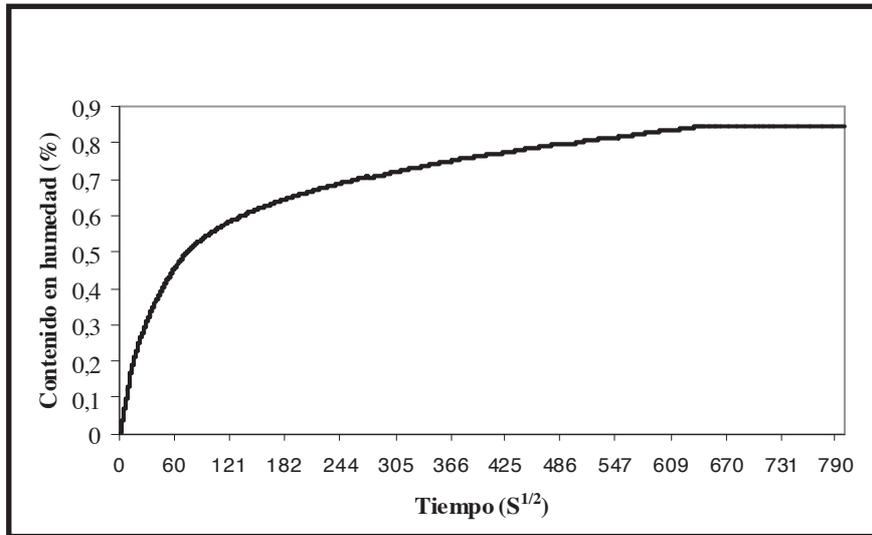


Distribución de tamaños de acceso de poro.

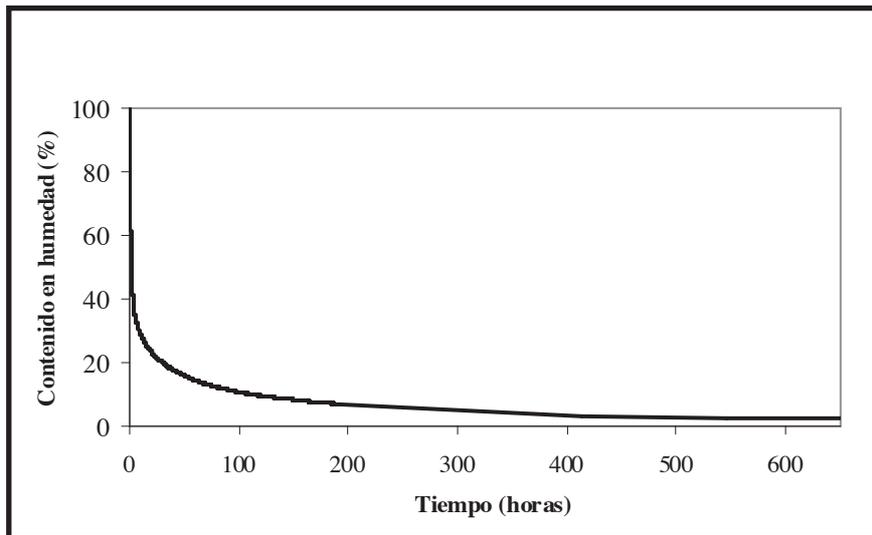


Sigla: 30-D

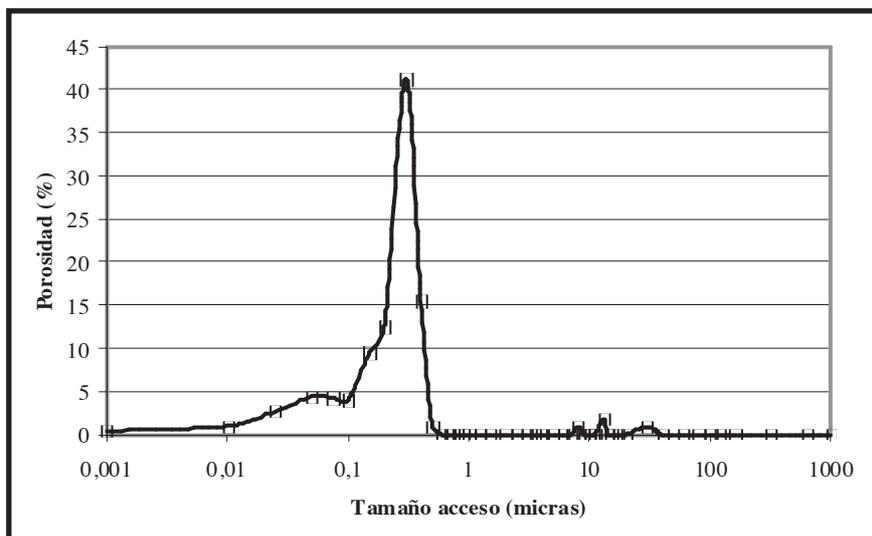
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

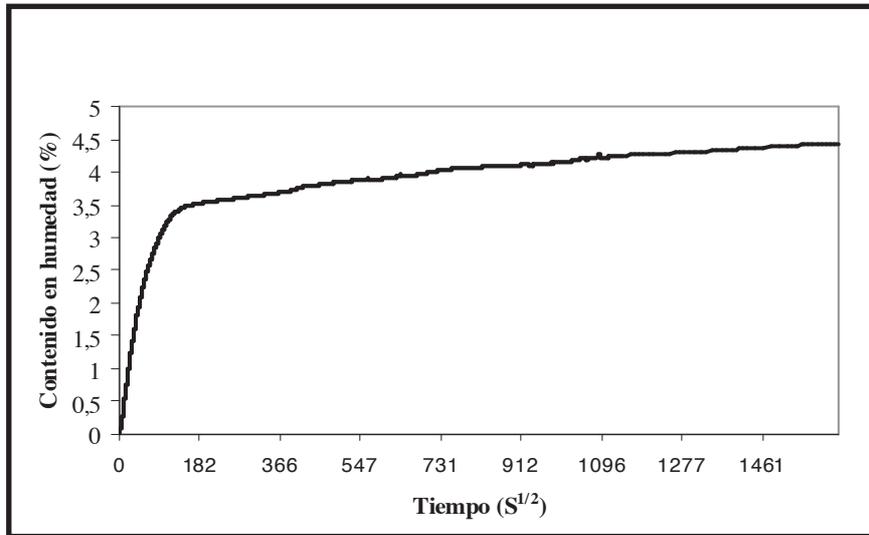


Distribución de tamaños de acceso de poro.

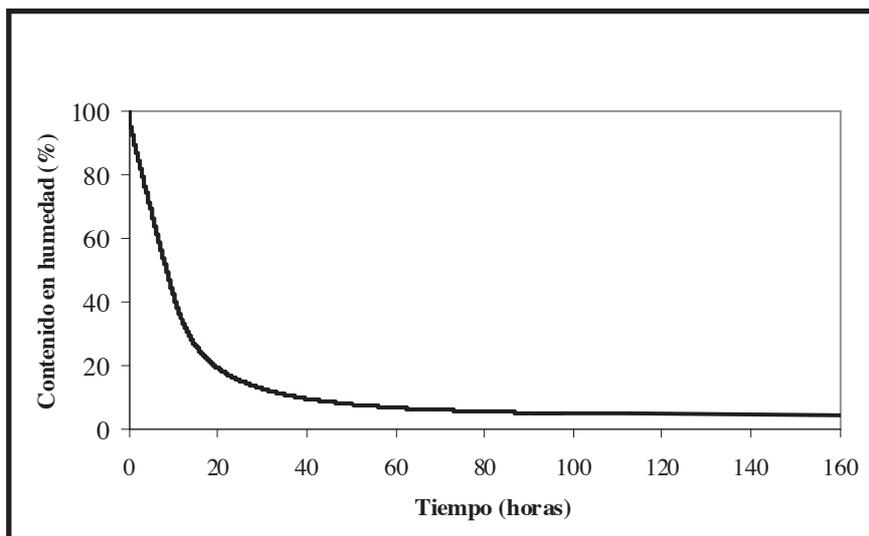


Sigla: 31-B11

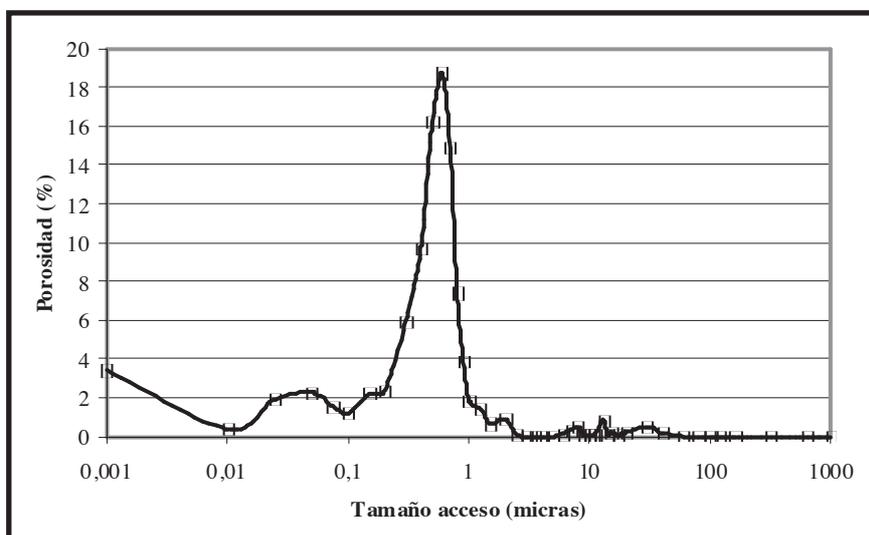
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

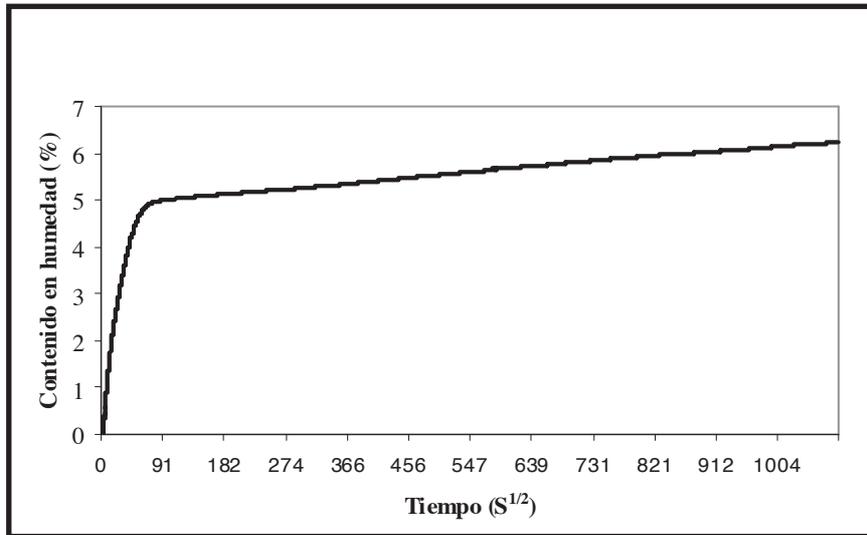


Distribución de tamaños de acceso de poro.

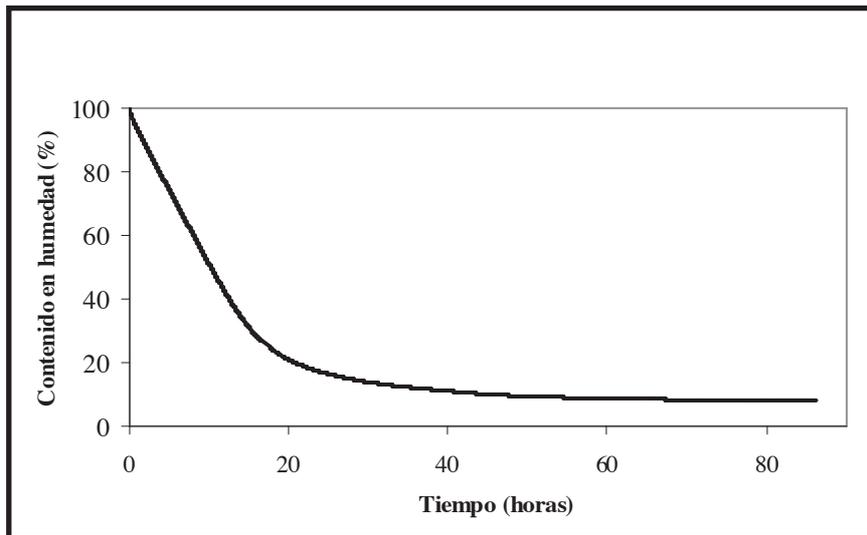


Sigla: 31-B12

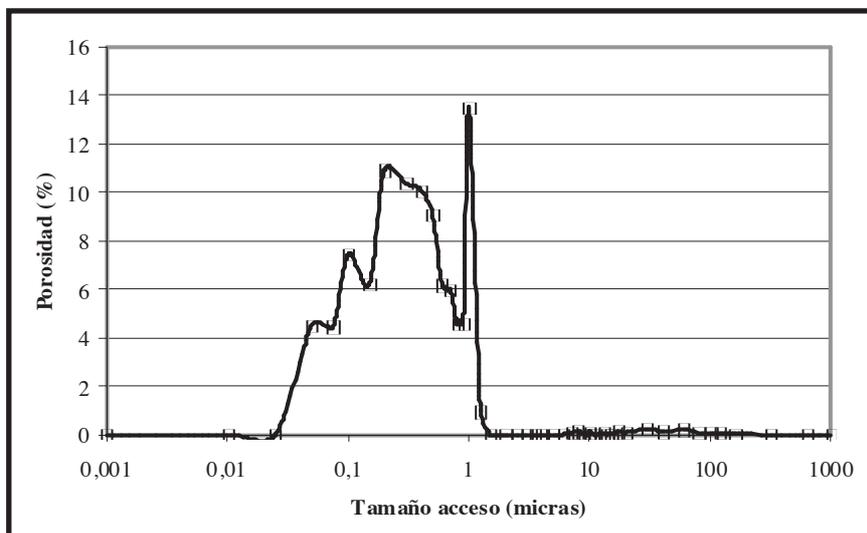
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.

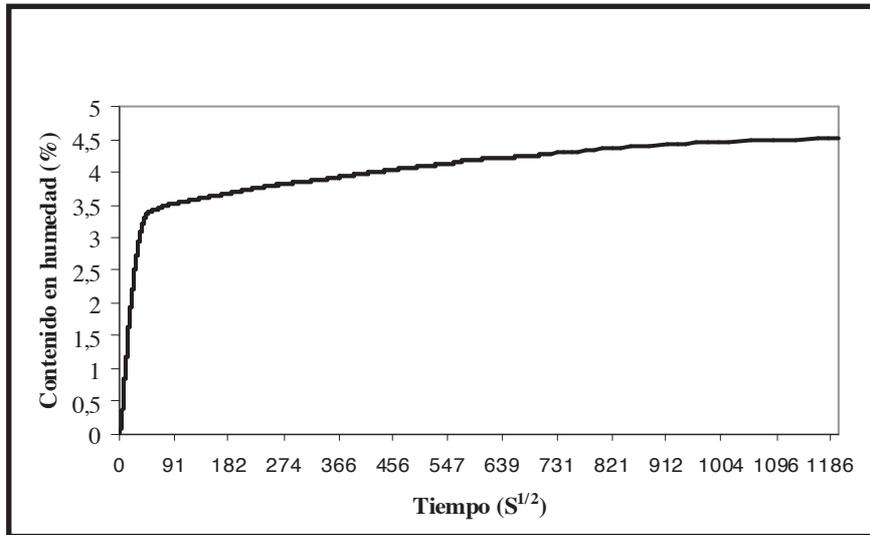


Distribución de tamaños de acceso de poro.

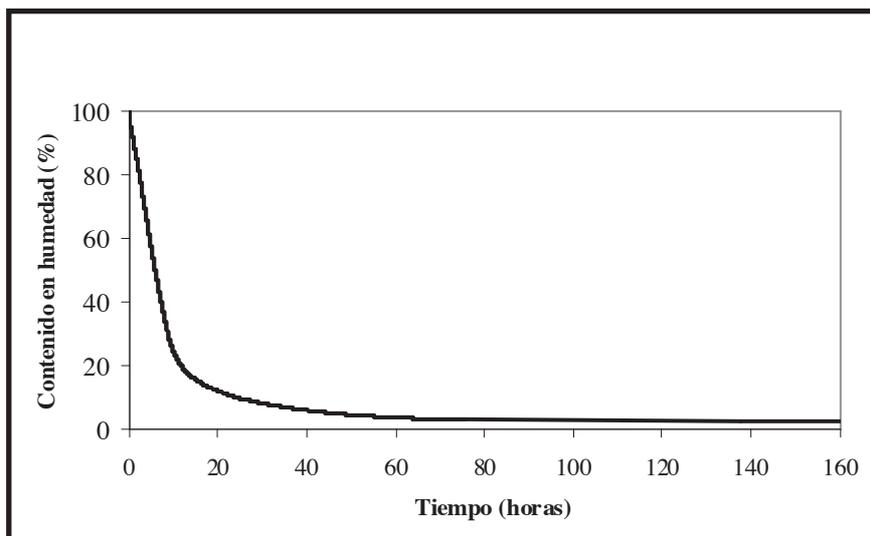


Sigla: 31-B13

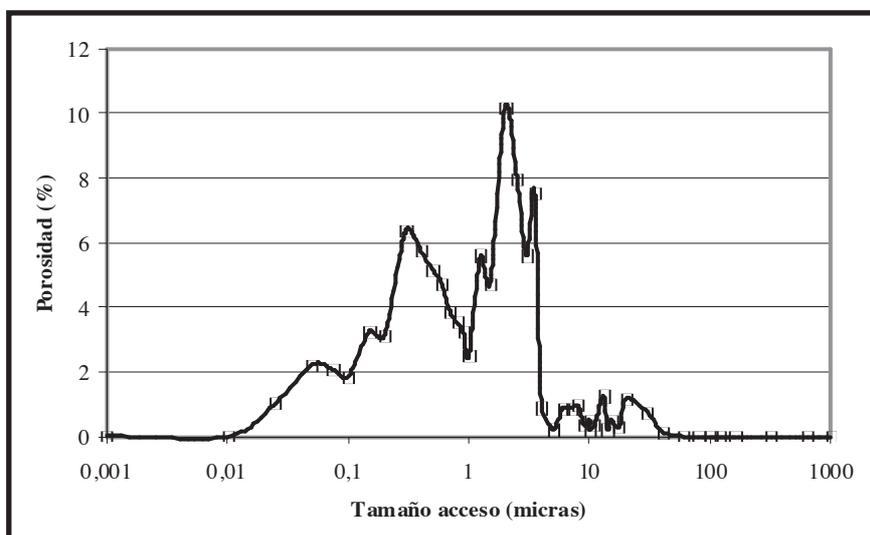
Curva de absorción libre de agua.



Curva de evaporación.



Distribución de tamaños de acceso de poro.



ANEXO 2

Curvas de absorción capilar antes y después de someter las probetas al ensayo de cristalización de sales.

En este anexo se recogen las gráficas de absorción capilar, para las mismas probetas, antes y después del ensayo de cristalización de sales. Este ensayo se ha realizado sobre tandas de 3 probetas representándose las mismas probetas, antes y después del ensayo de cristalización de sales, con el mismo color.

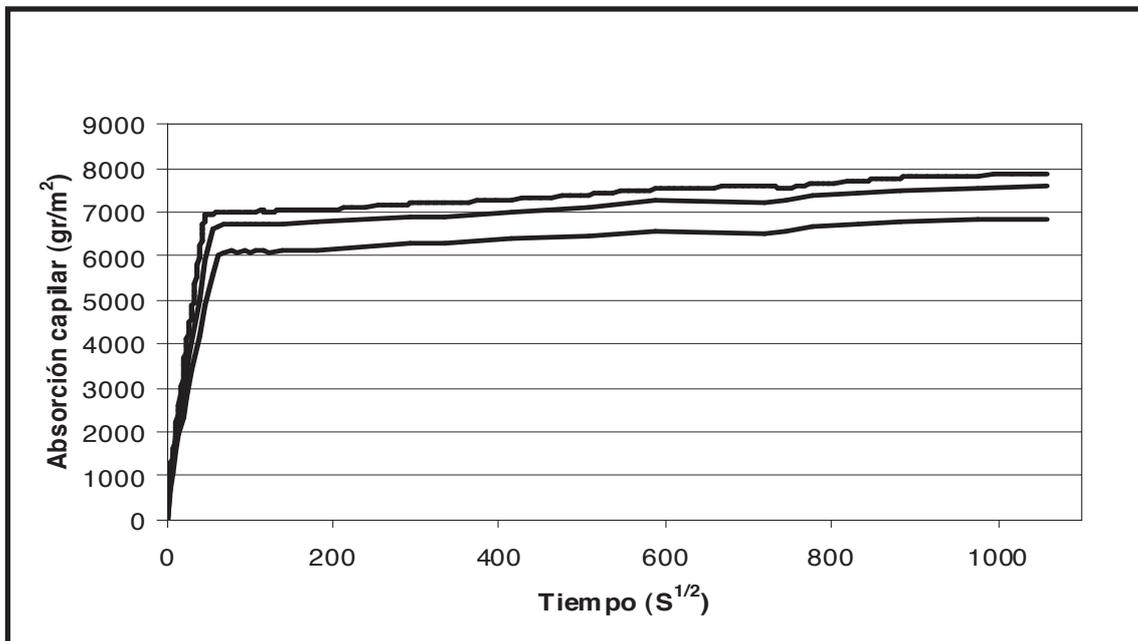
Además, se recogen las gráficas de absorción capilar tras aplicar los productos consolidantes en las rocas 6-Un, 7-Ay, 10-Az y 31-B12 (SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- paraloid, In- inmersión y Br- brocha) y tras realizar el ensayo de cristalización de sales sobre las probetas consolidadas en 31-B12.

El ensayo de absorción capilar tras cristalización de sales no se ha realizado sobre las arenitas debido a su alto grado de deterioro que originaba una continua pérdida de material durante la realización del ensayo.

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 la masa de agua absorbida por unidad de superficie del área de la base de la probeta sumergida.

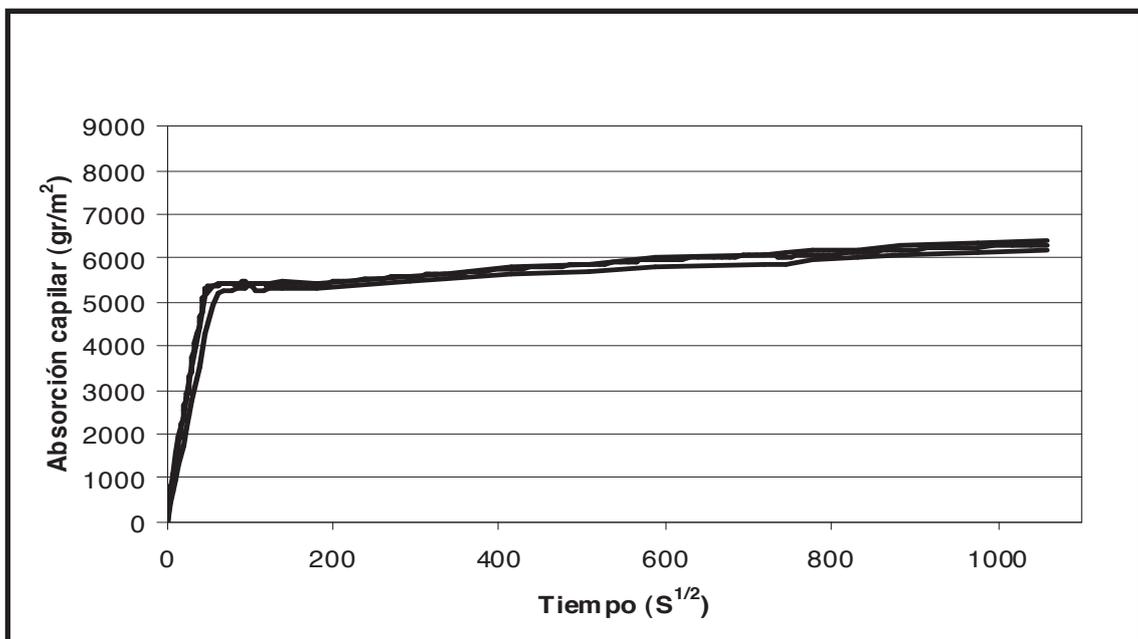
SIGLA: 6-UN

Absorción capilar.



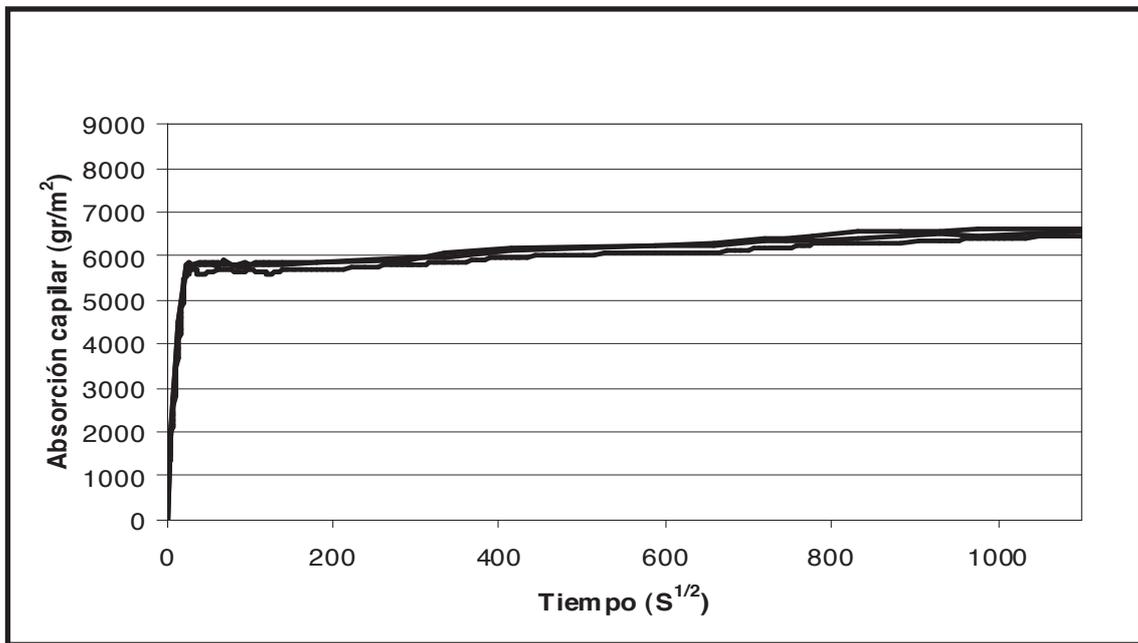
SIGLA: 7-Ay

Absorción capilar.



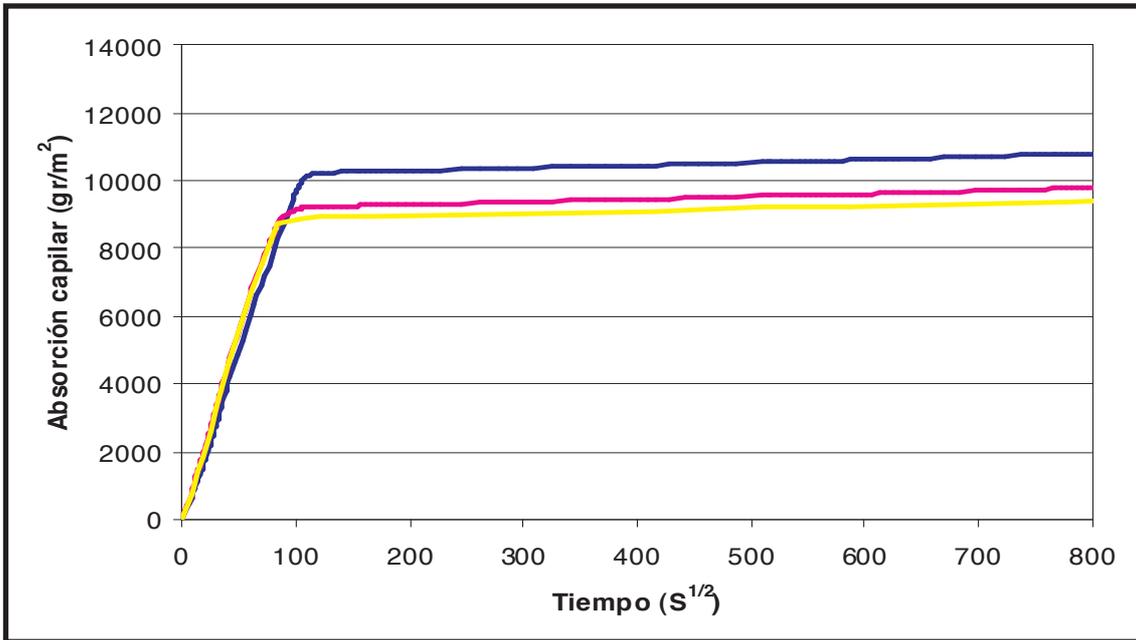
SIGLA: 10-Az

Absorción capilar.

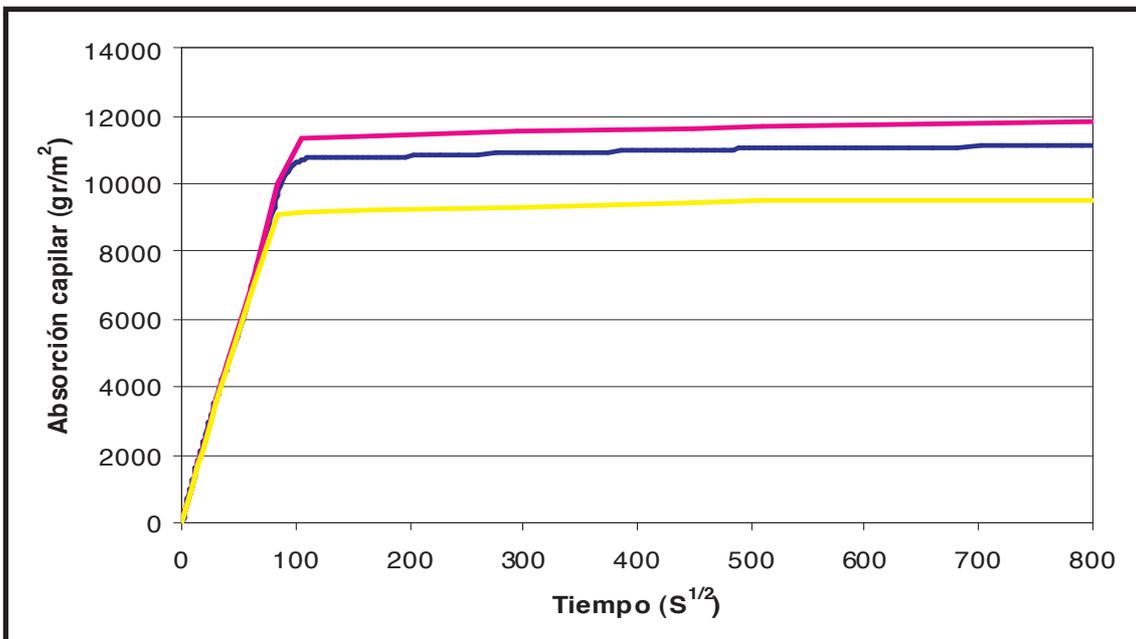


SIGLA: 8-Tu

Absorción capilar.

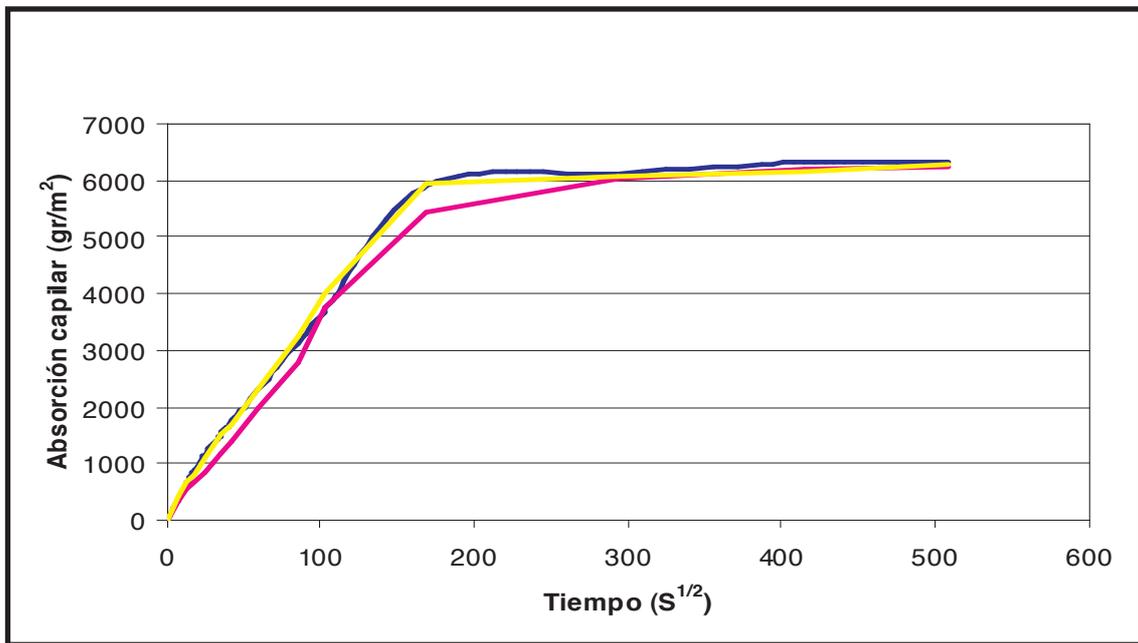


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

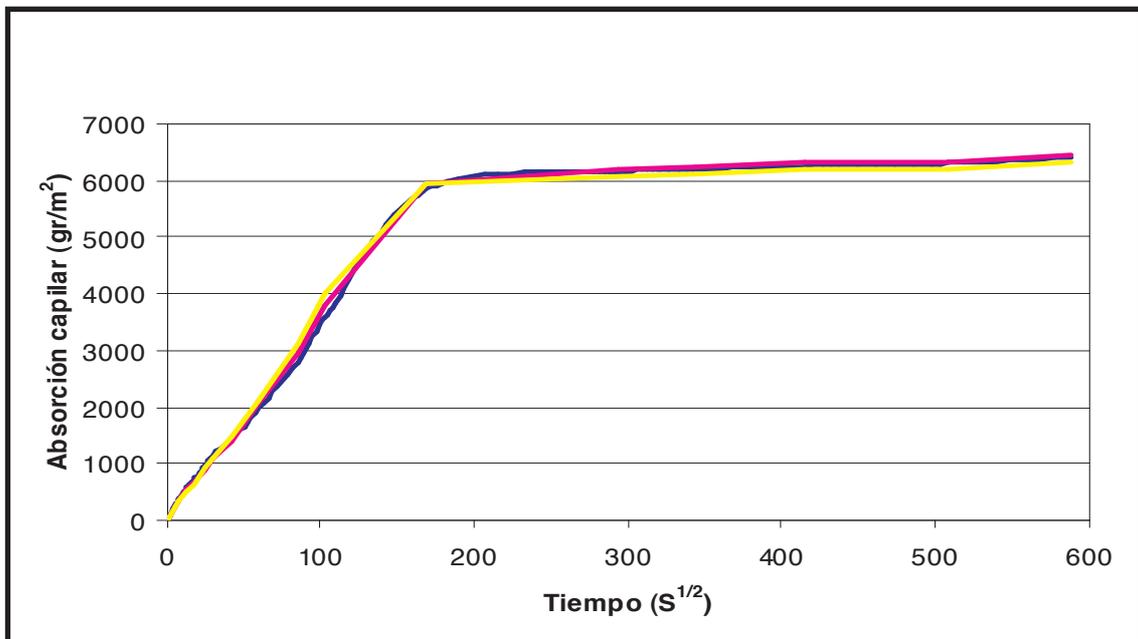


SIGLA: 9-Fr

Absorción capilar.

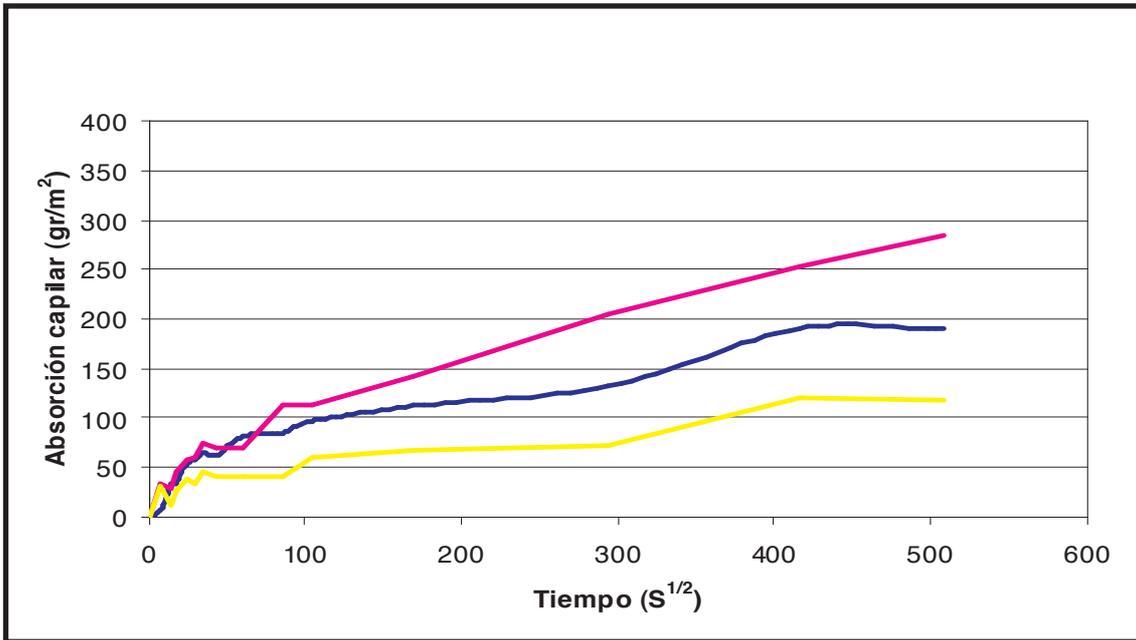


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

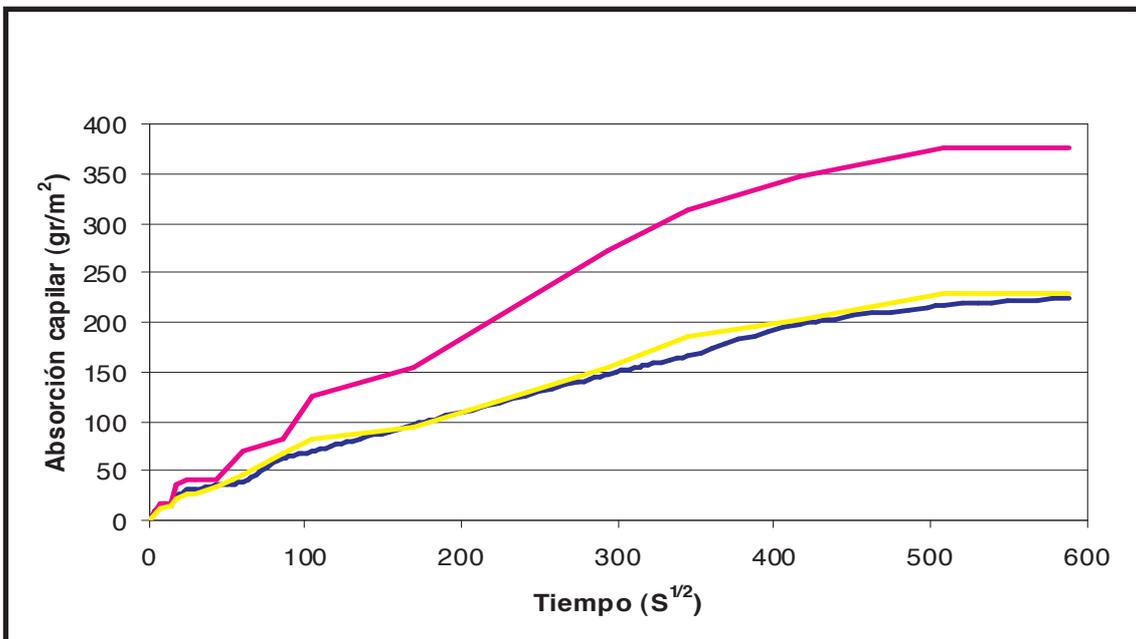


SIGLA: 12-Ca

Absorción capilar.

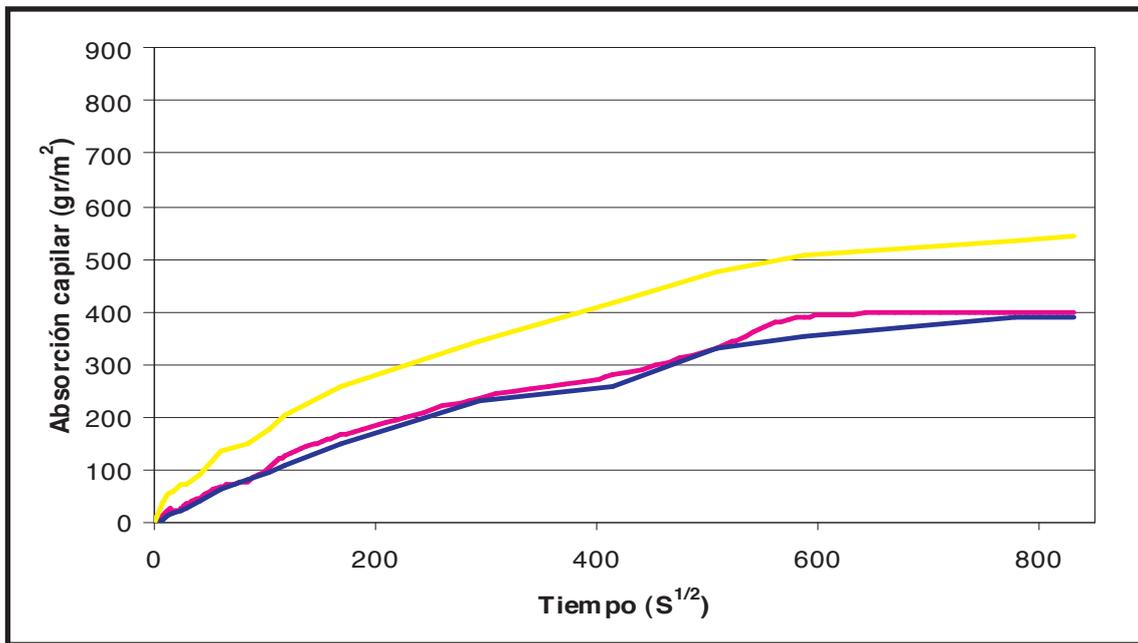


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

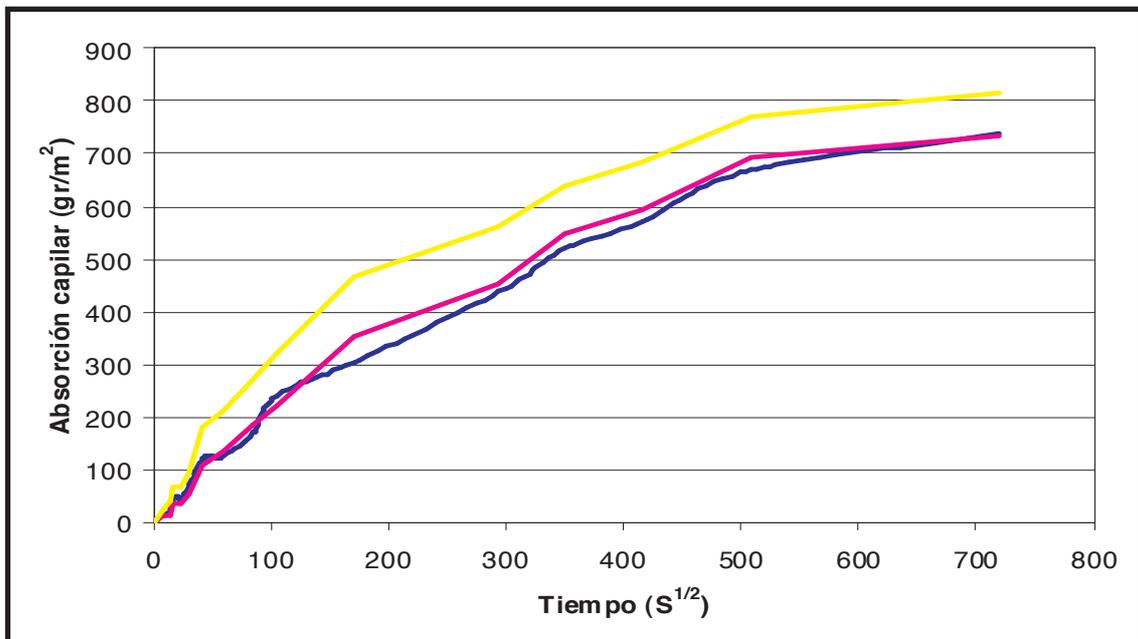


SIGLA: 13-Pu

Absorción capilar.

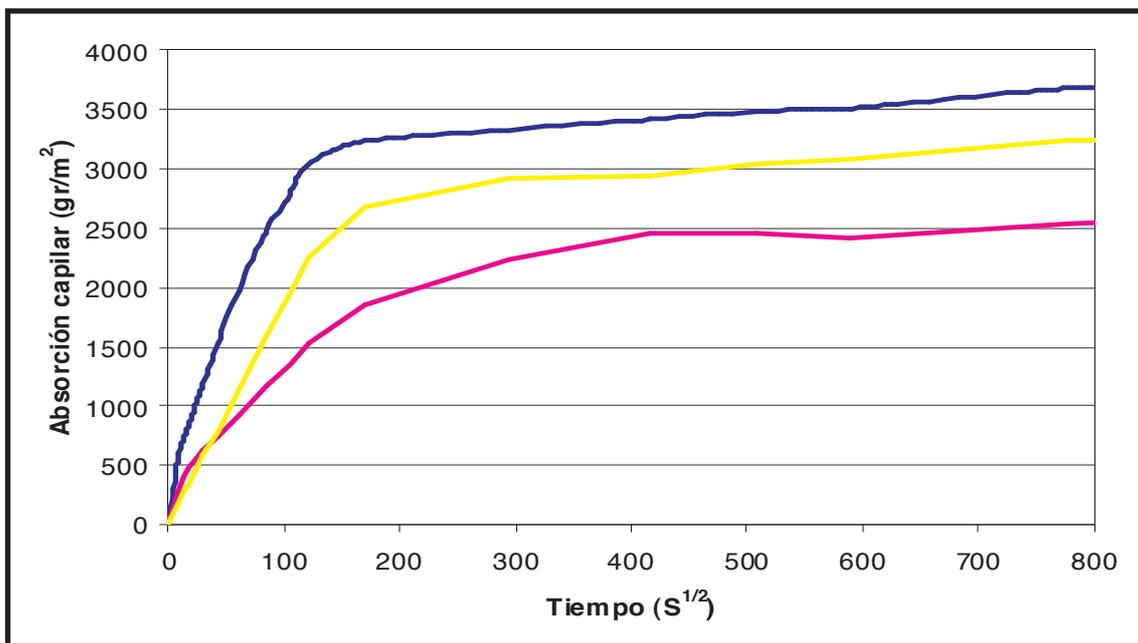


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

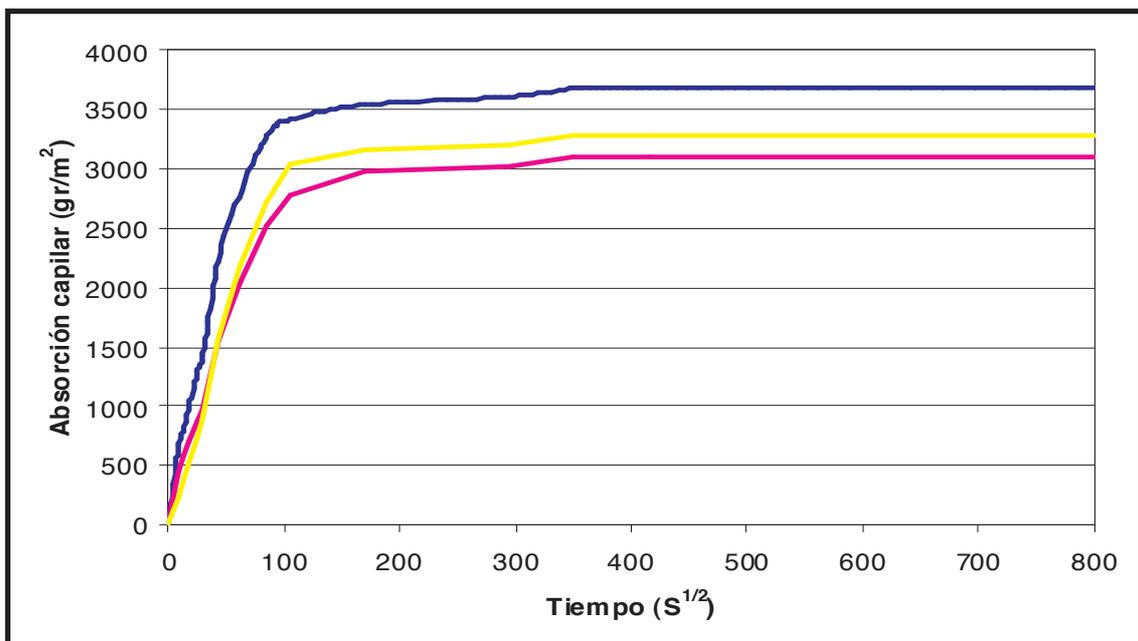


SIGLA: 16-VI-I

Absorción capilar.

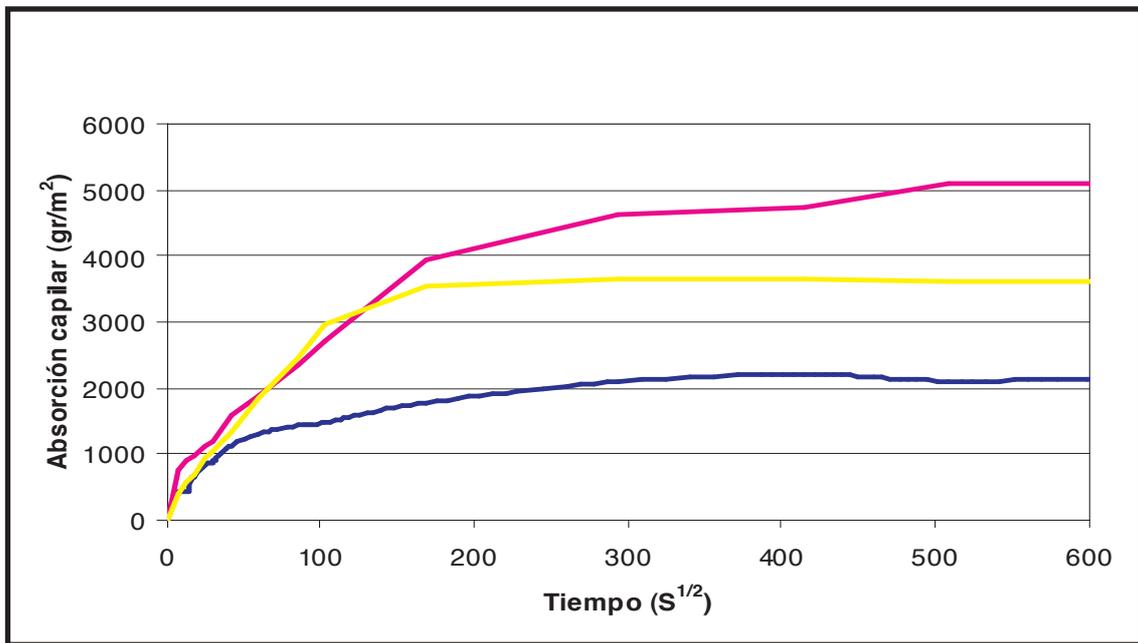


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

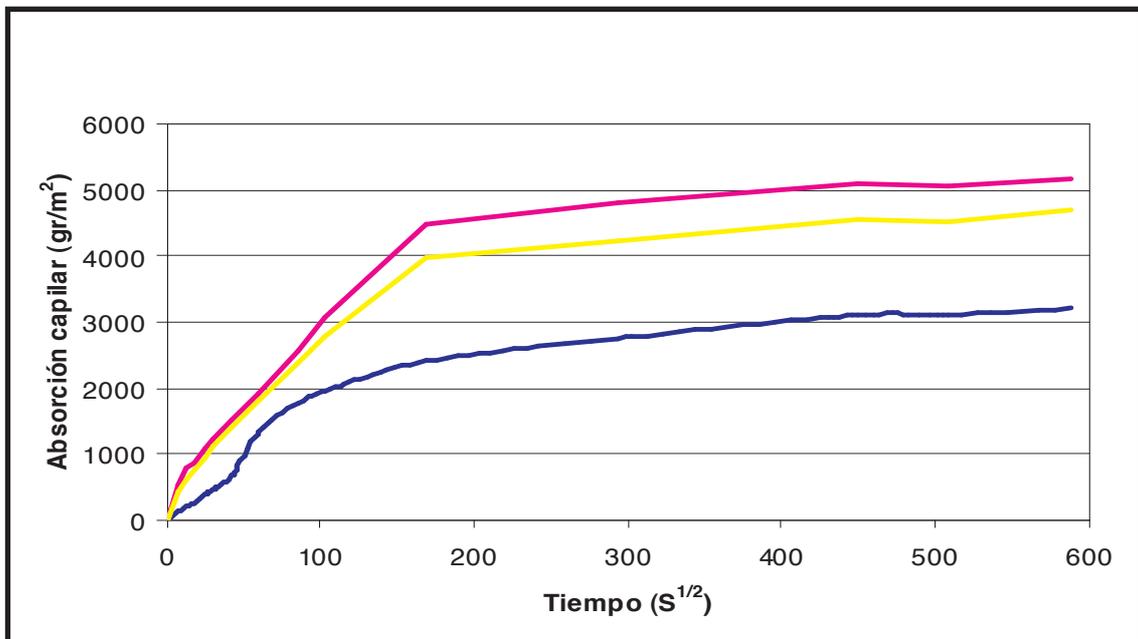


SIGLA: 17-CFI

Absorción capilar.

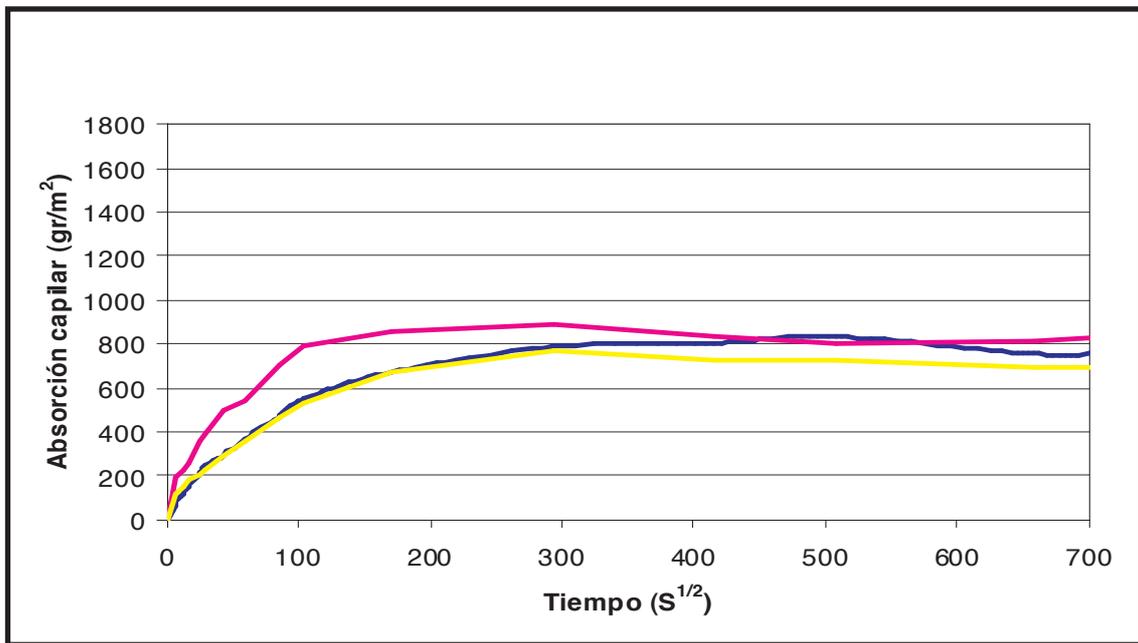


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

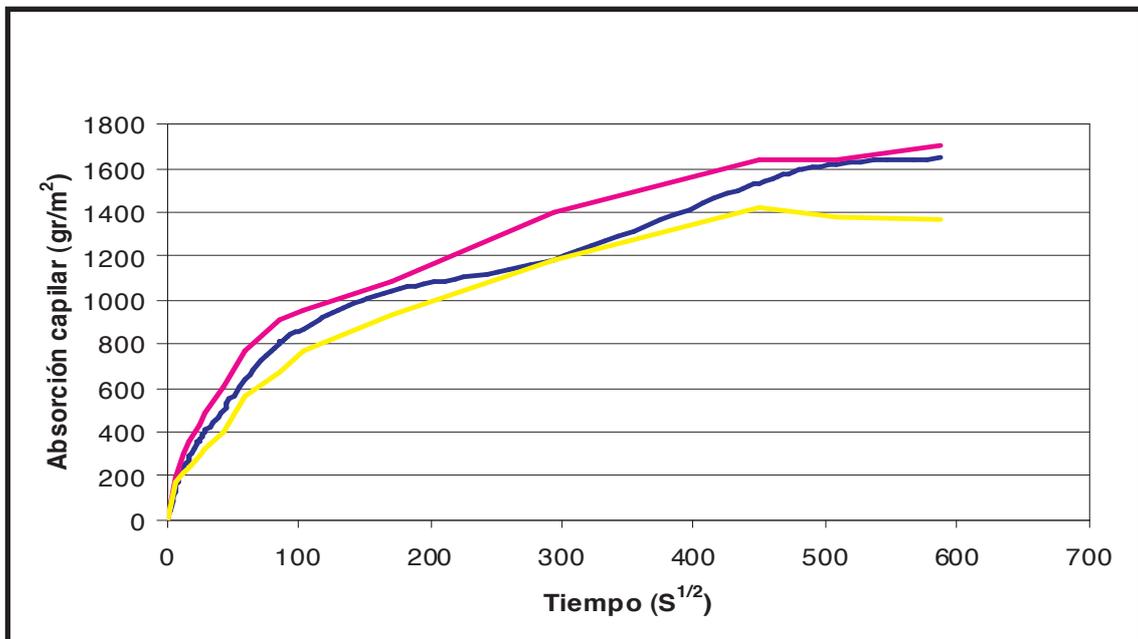


SIGLA: 17-CFS

Absorción capilar.

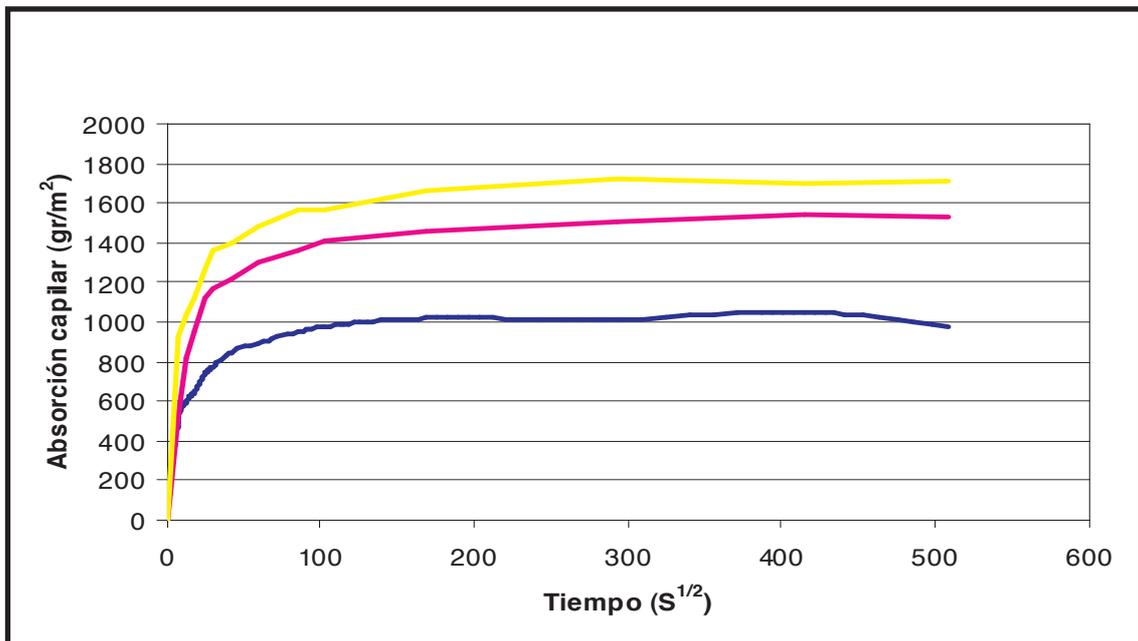


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

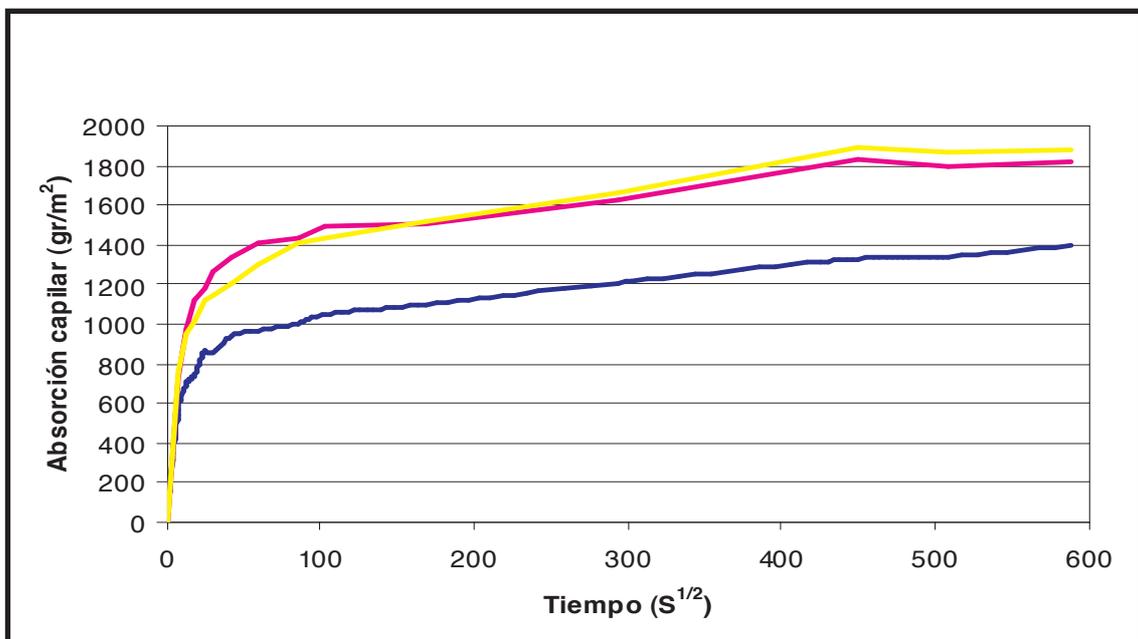


SIGLA: 18-VI-II

Absorción capilar.

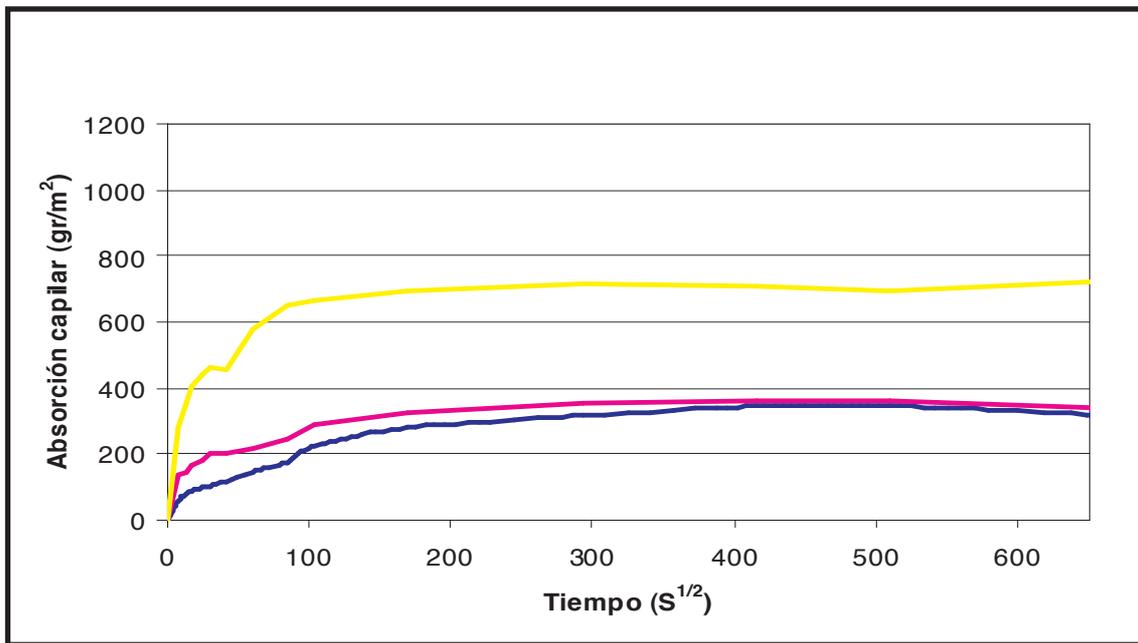


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

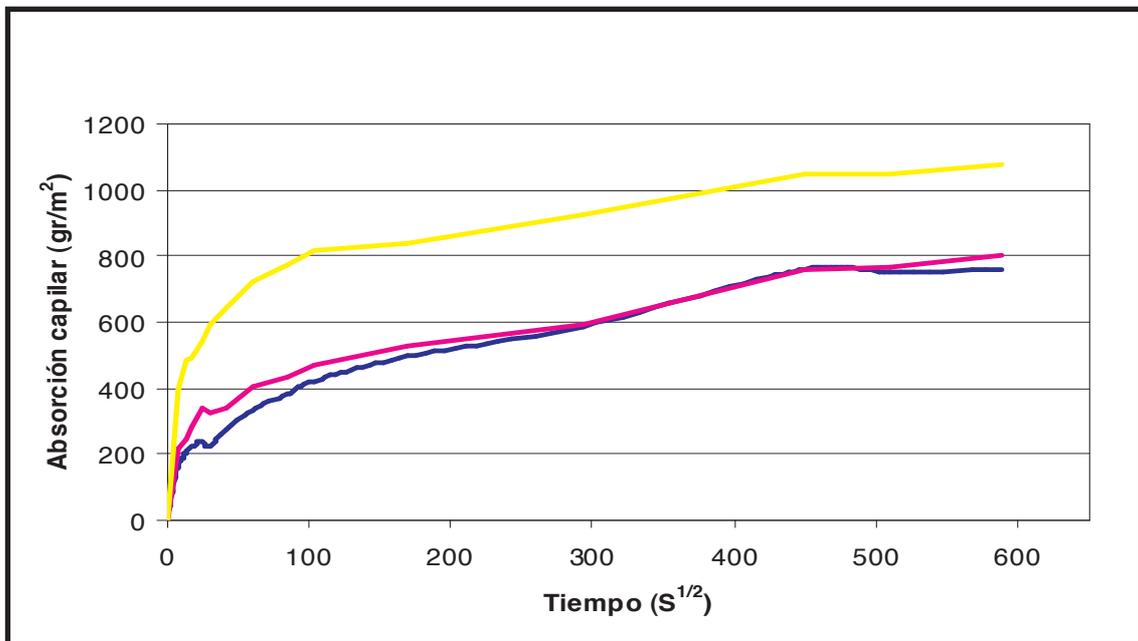


SIGLA: 27-Tr

Absorción capilar.

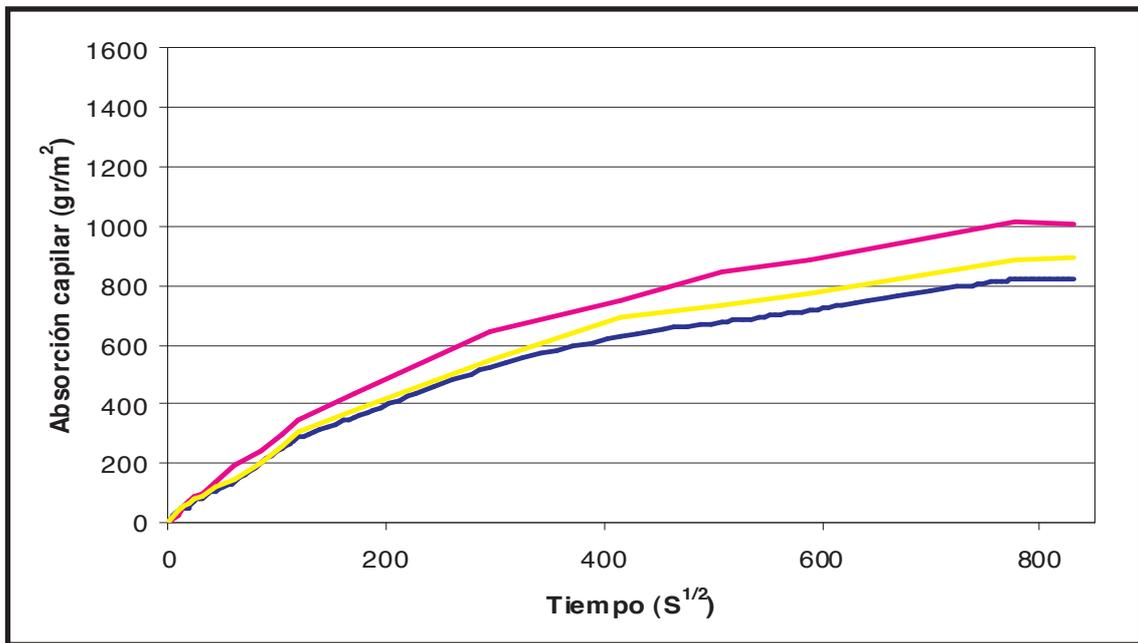


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

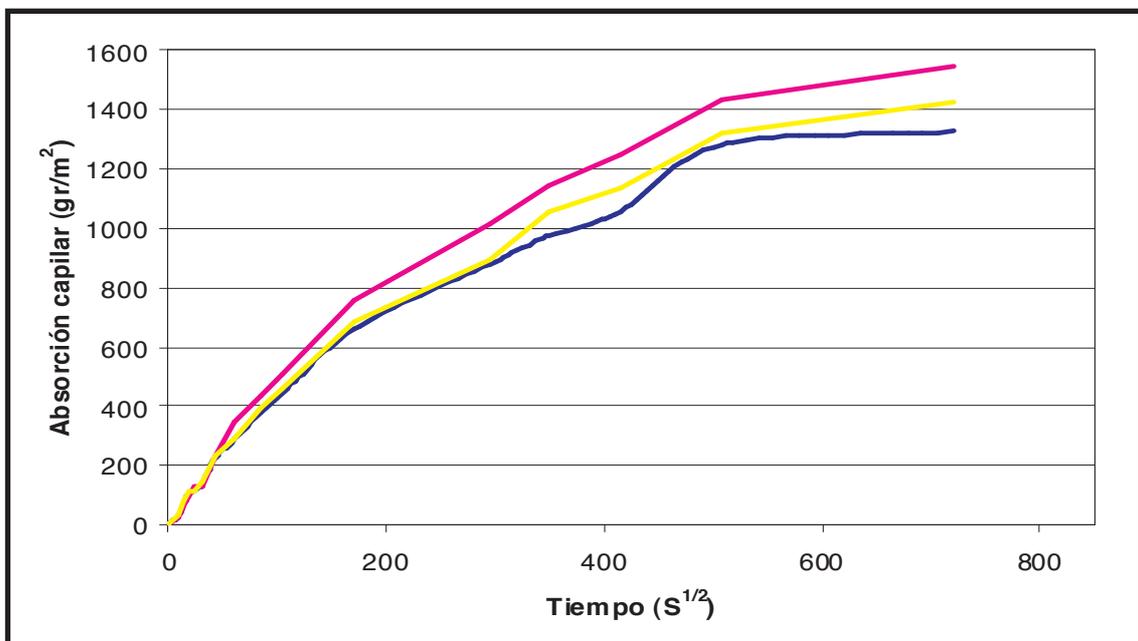


SIGLA: 28-Crt

Absorción capilar.

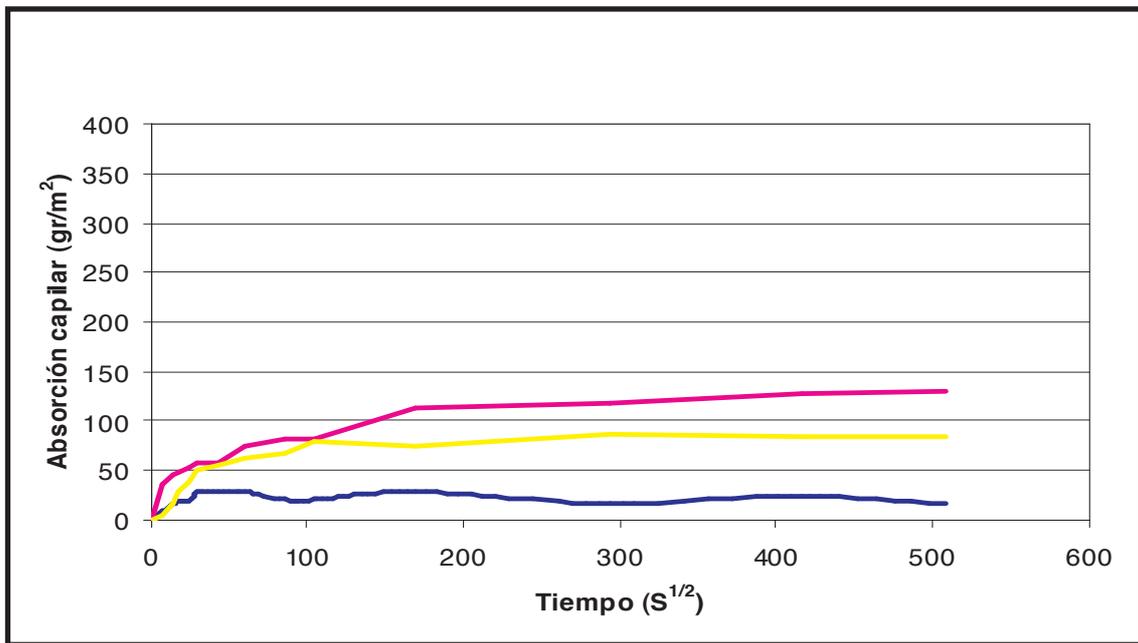


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

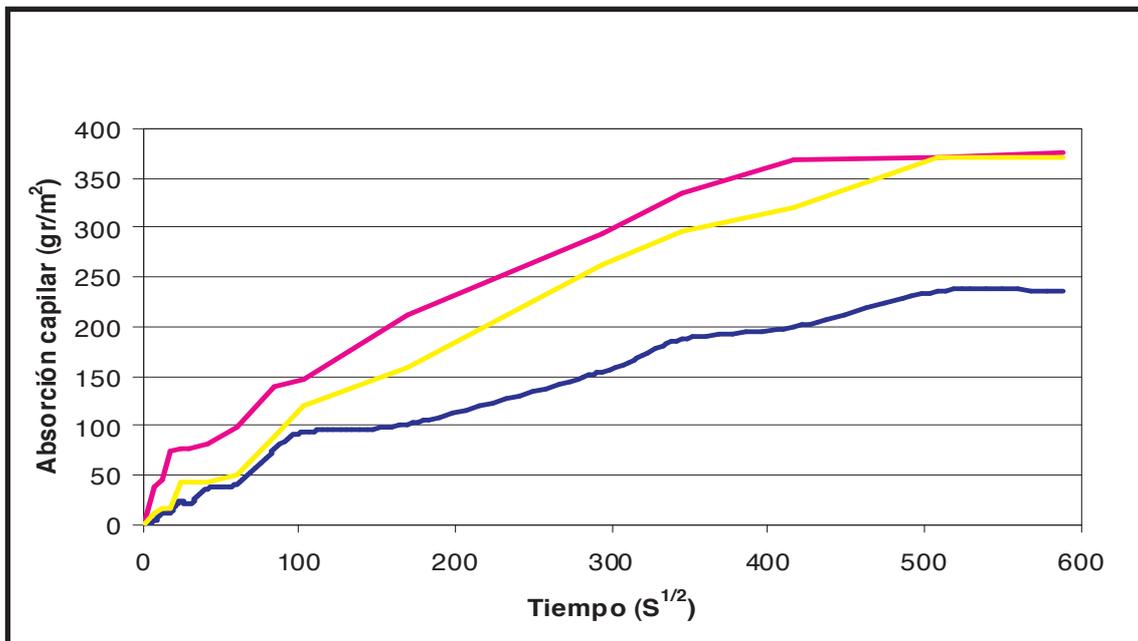


SIGLA: 29-A

Absorción capilar.

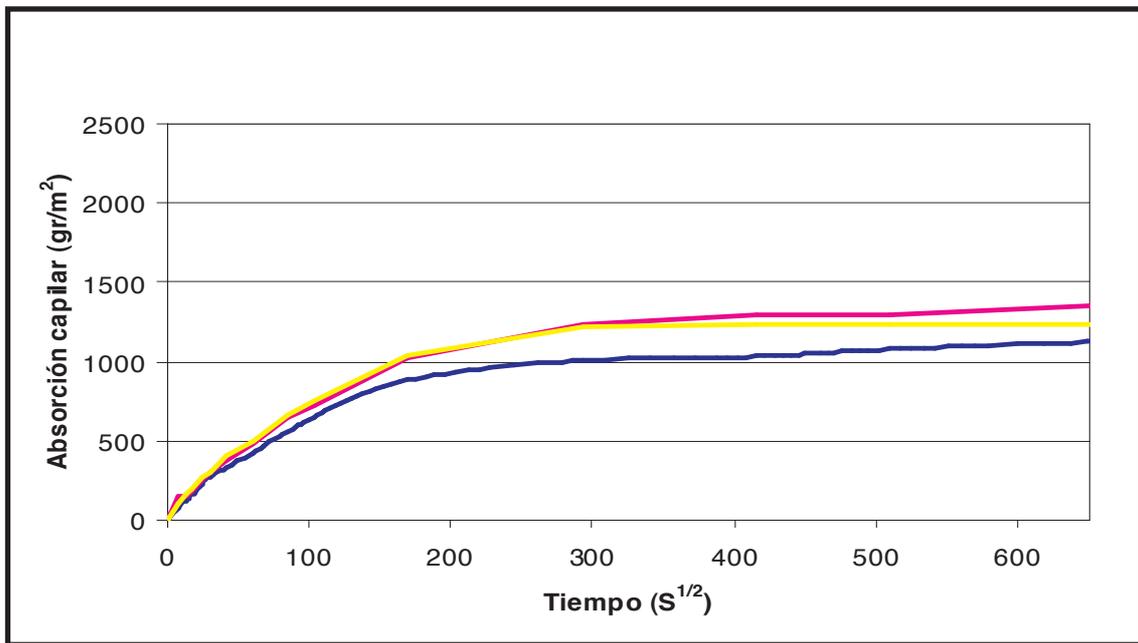


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

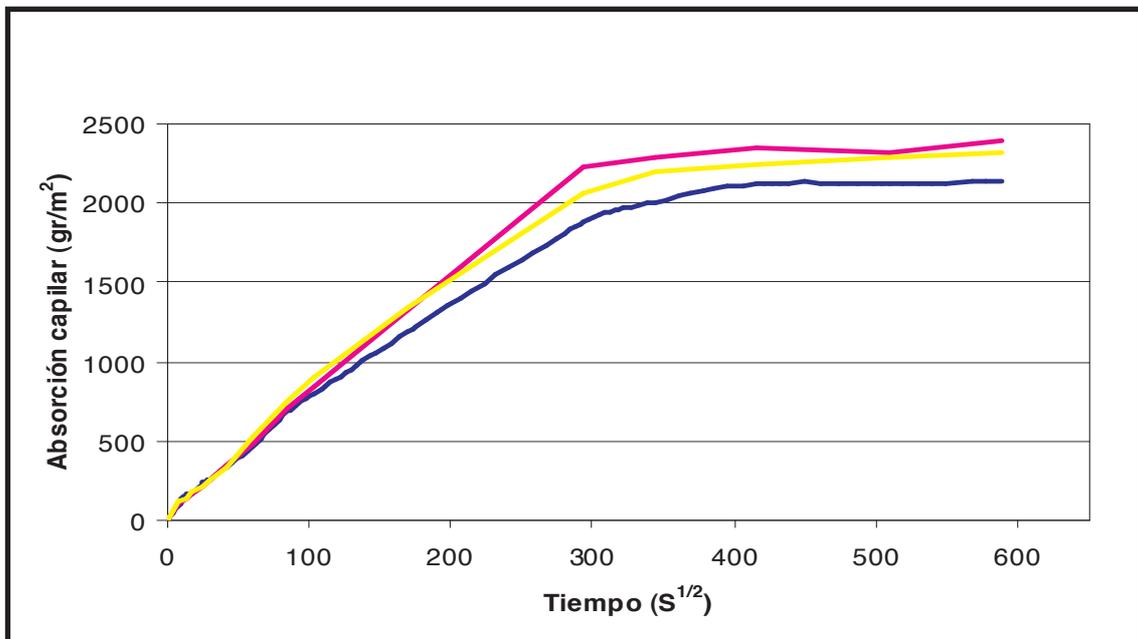


SIGLA: 30-D

Absorción capilar.

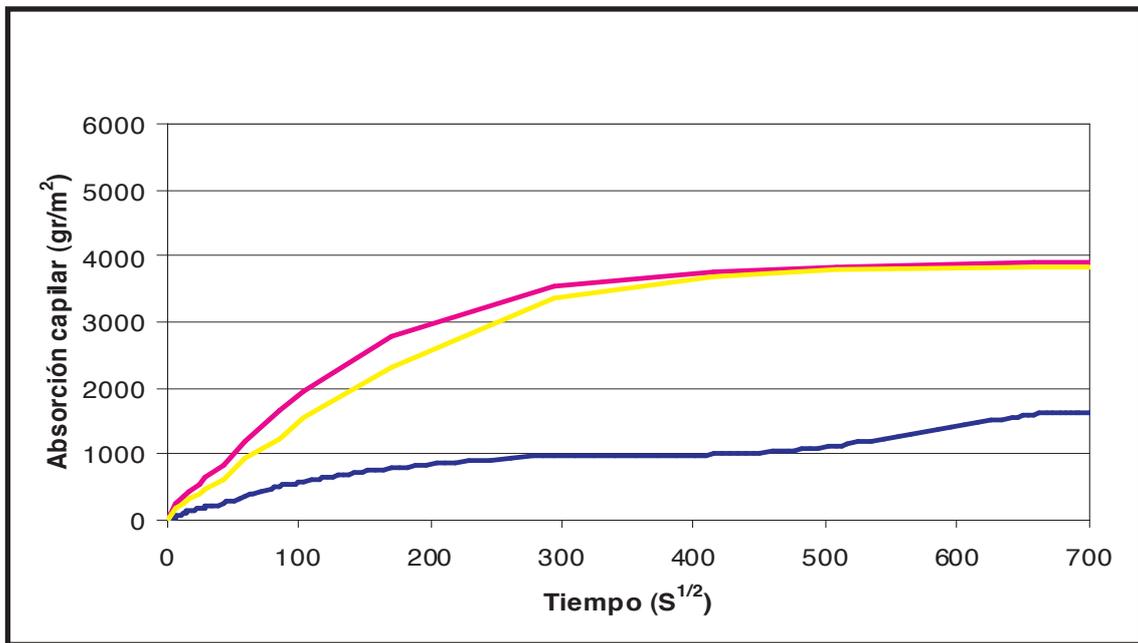


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

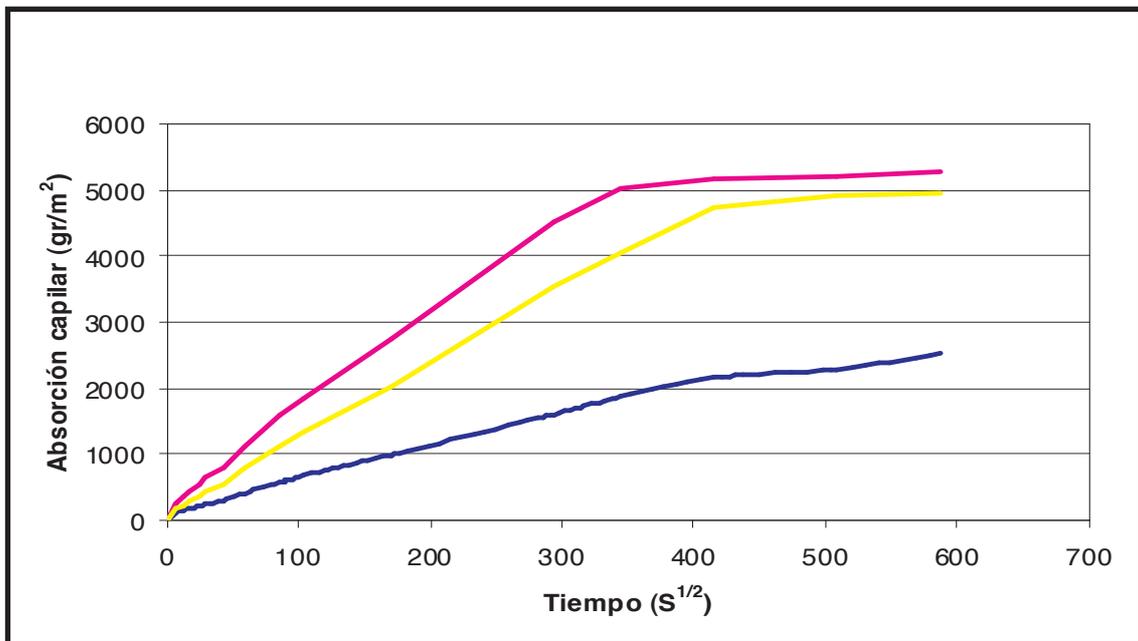


SIGLA: 31-B11

Absorción capilar.

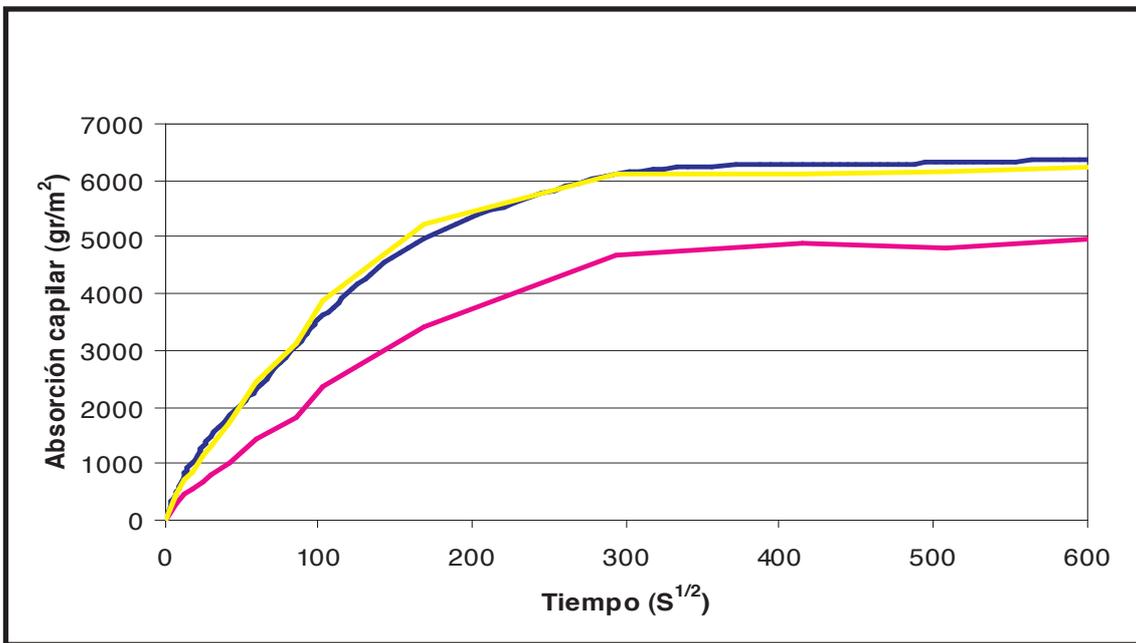


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

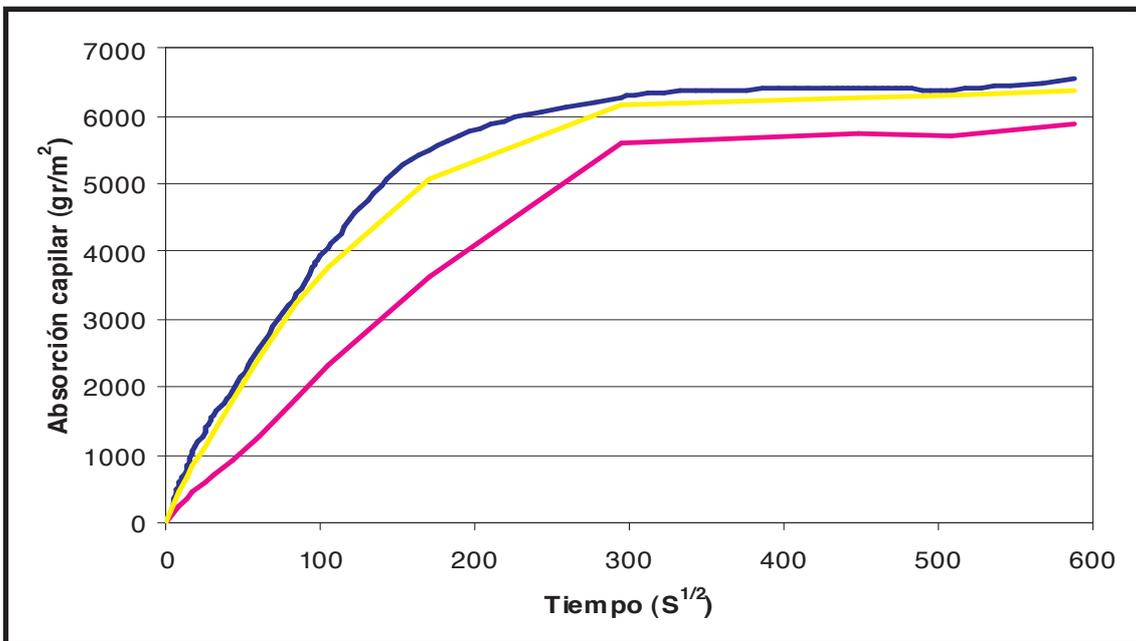


SIGLA: 31-B12

Absorción capilar.

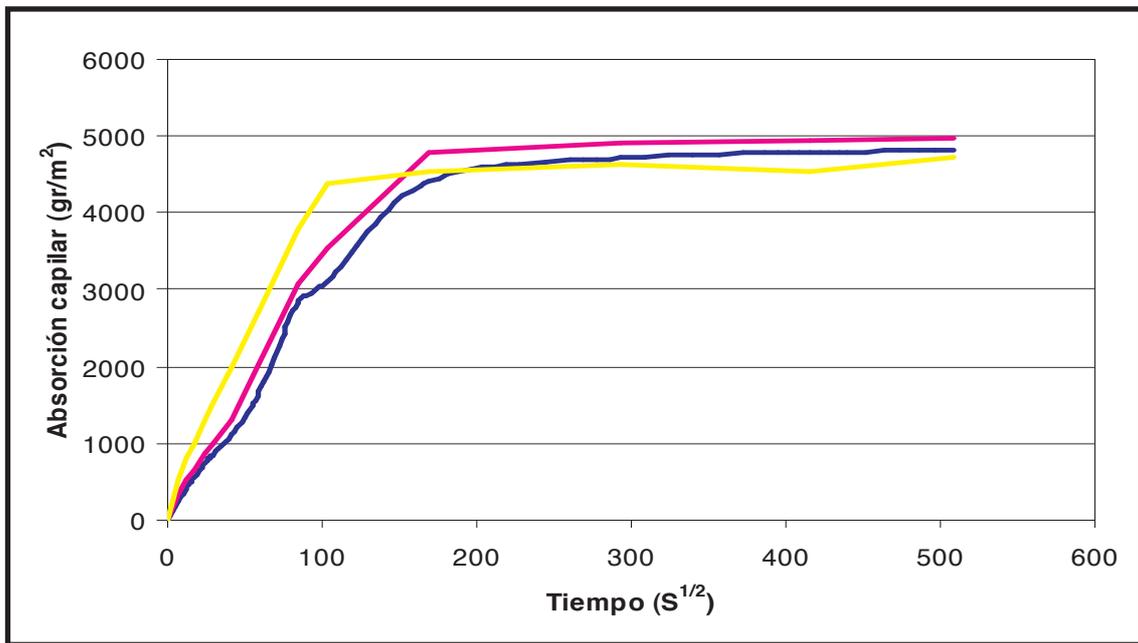


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

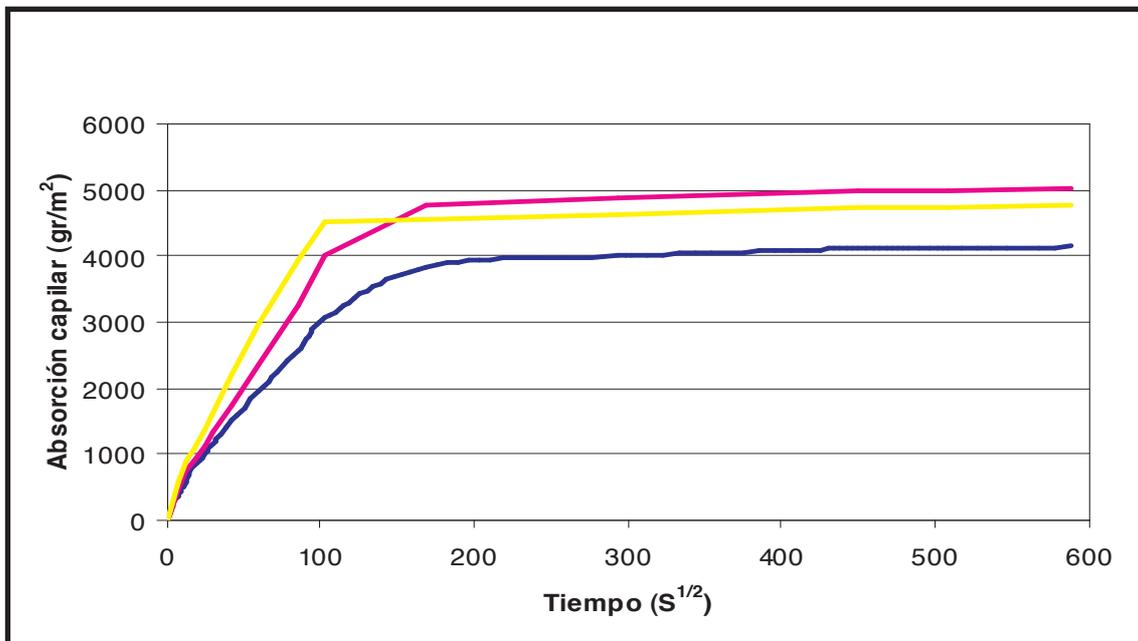


SIGLA: 31-B13

Absorción capilar.

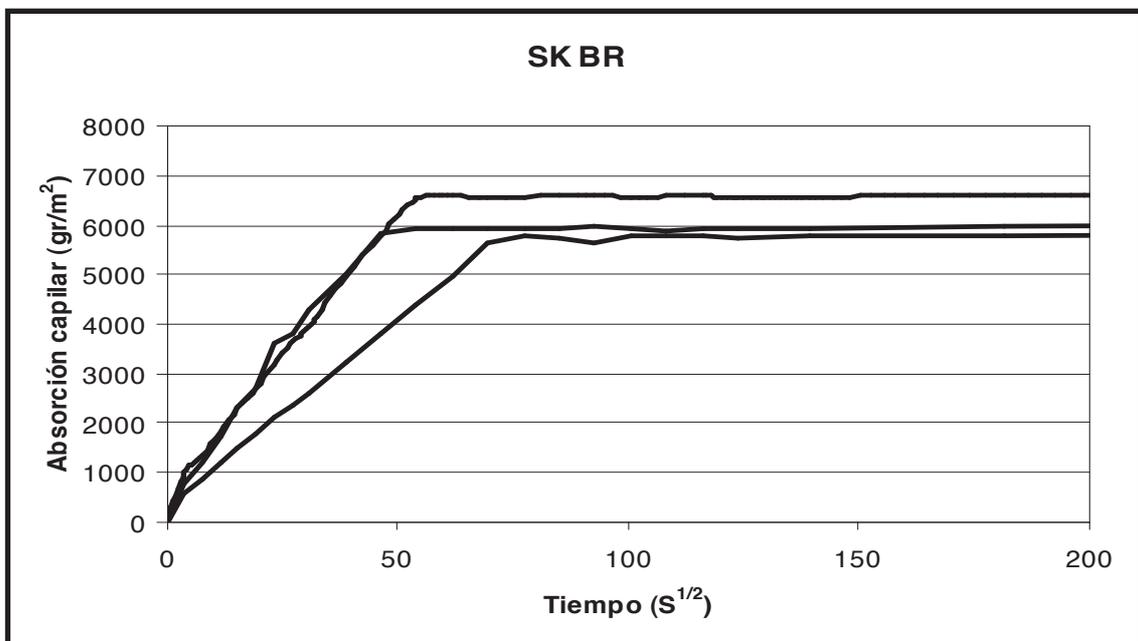
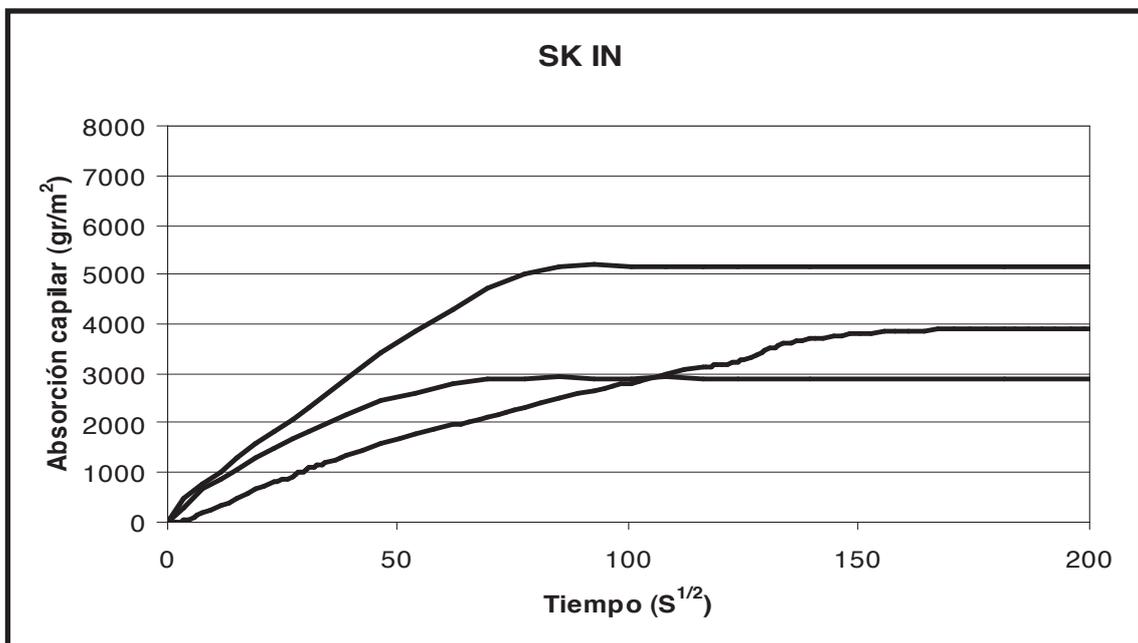


Absorción capilar tras el ensayo normalizado de cristalización de sales.

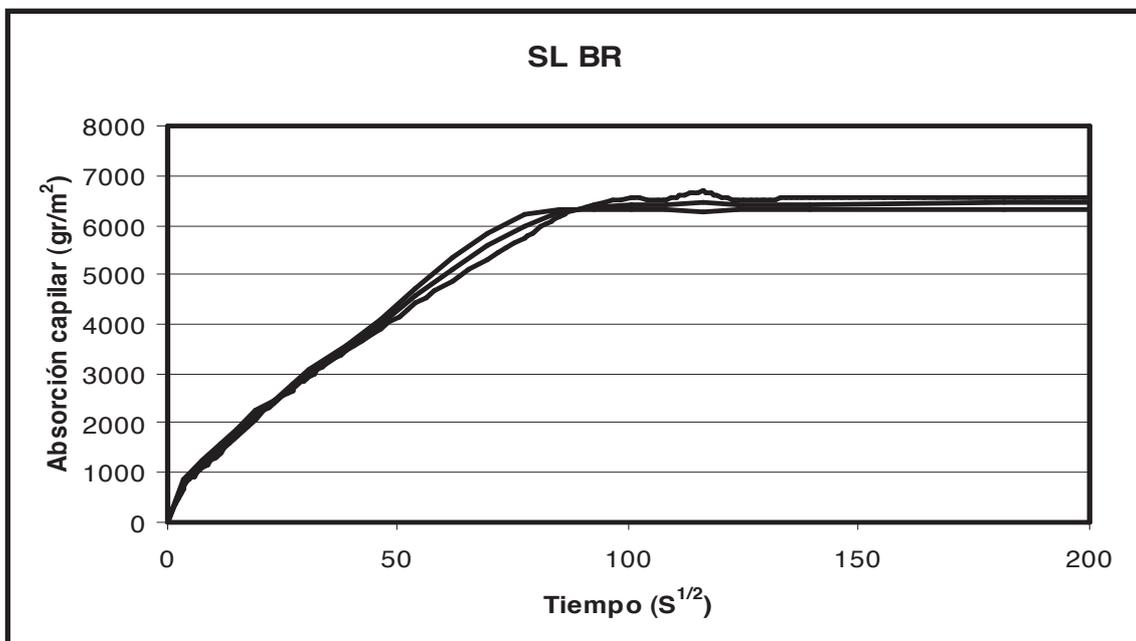
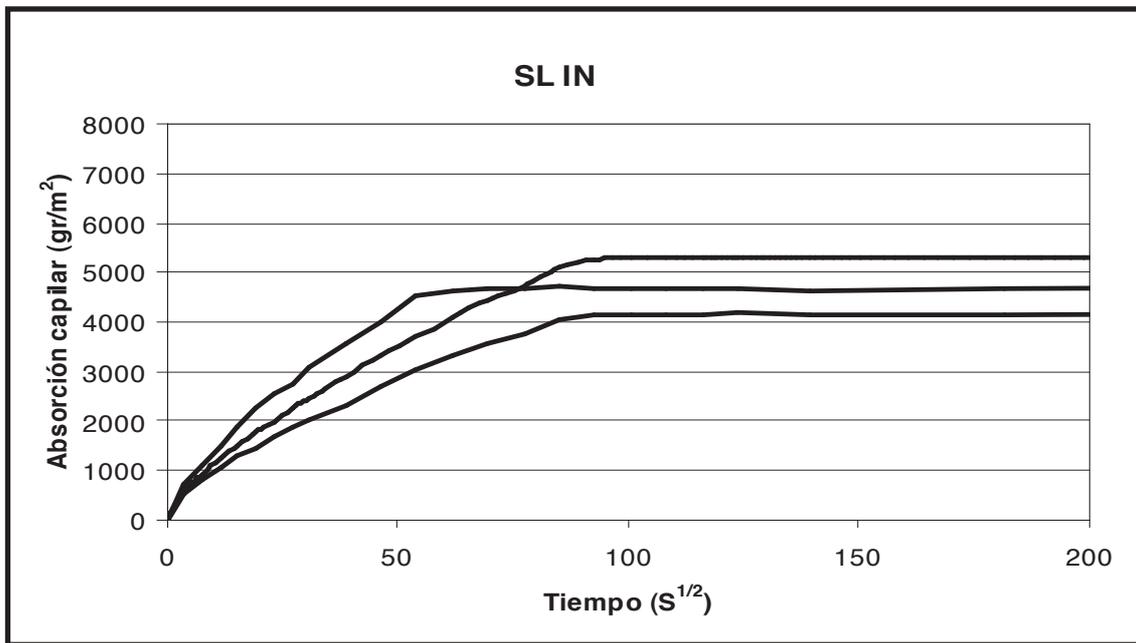


SIGLA: 6-Un

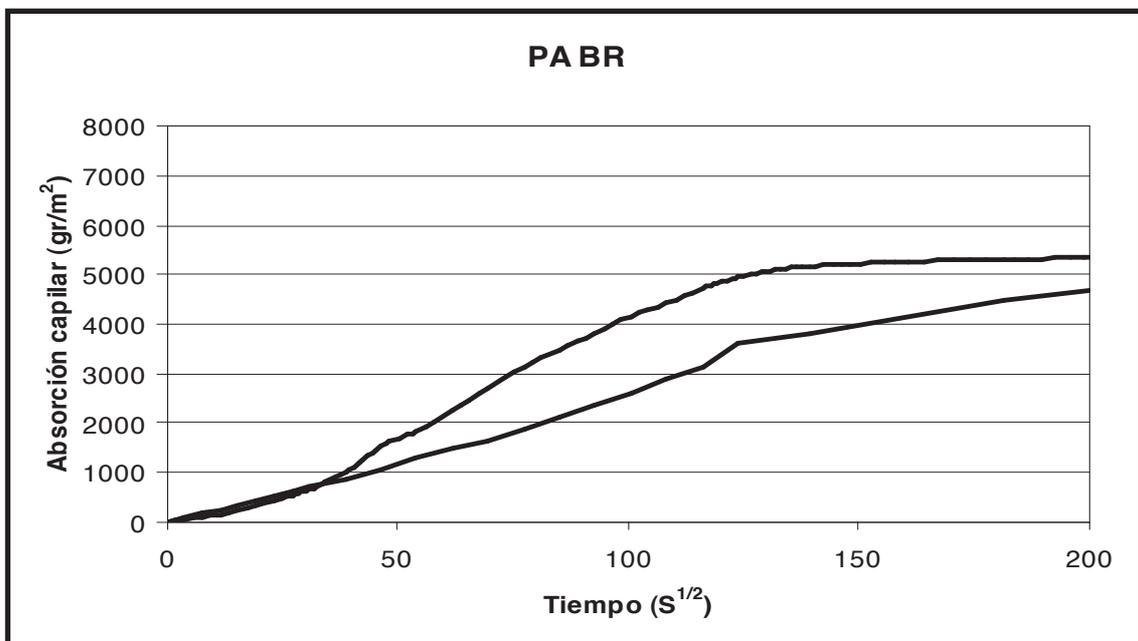
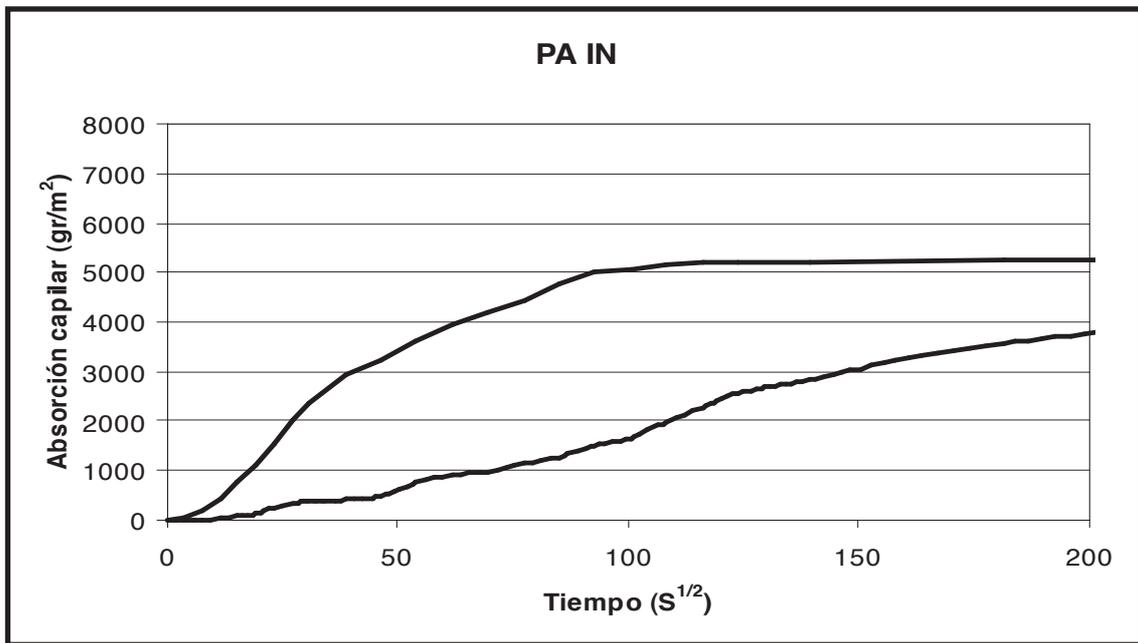
Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.



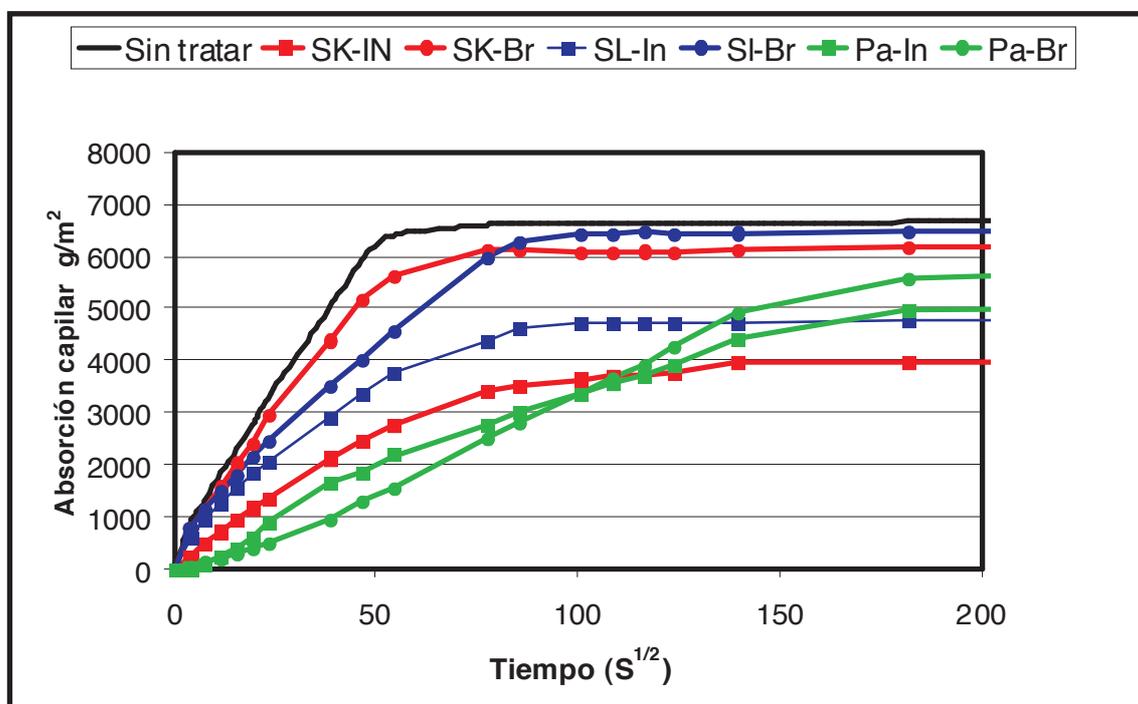
Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.



Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.

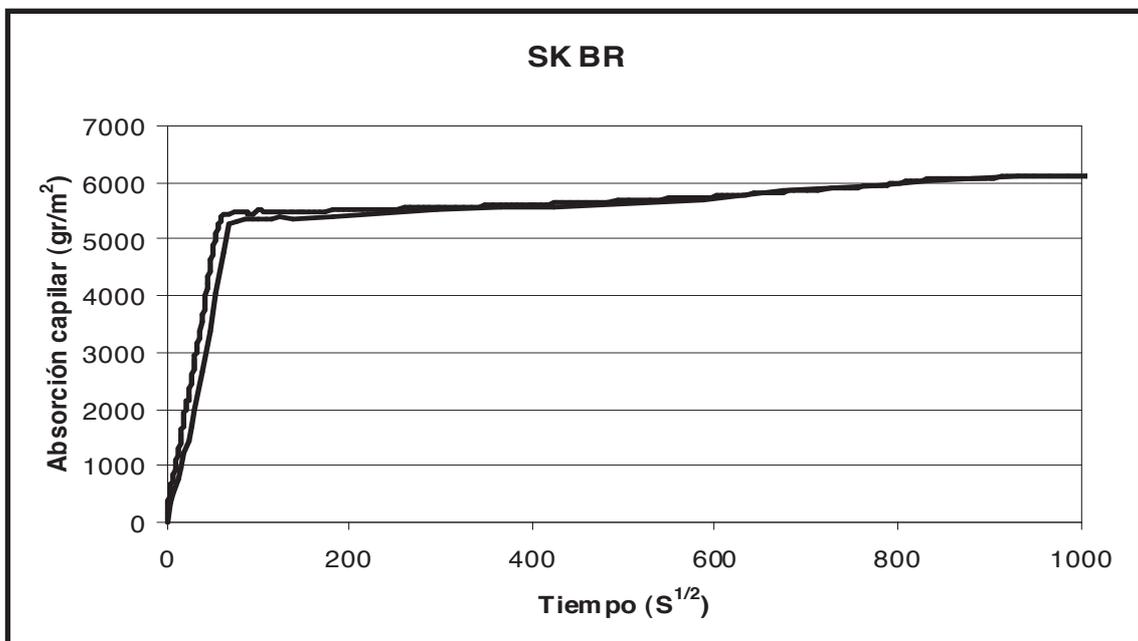
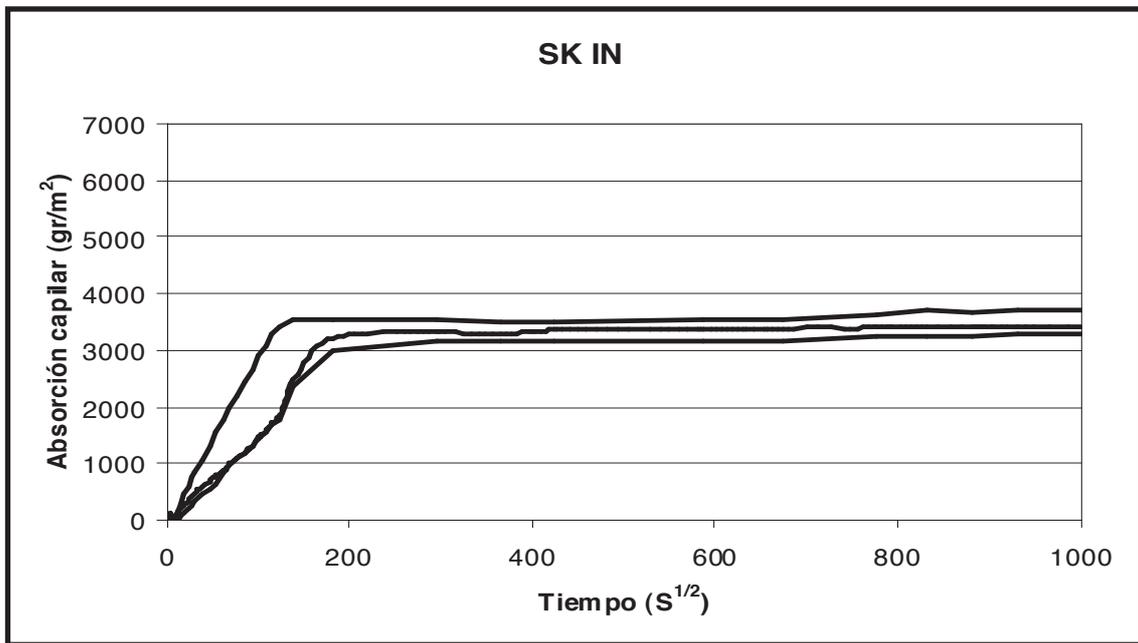


Resumen de la absorción capilar tras aplicar los consolidantes. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

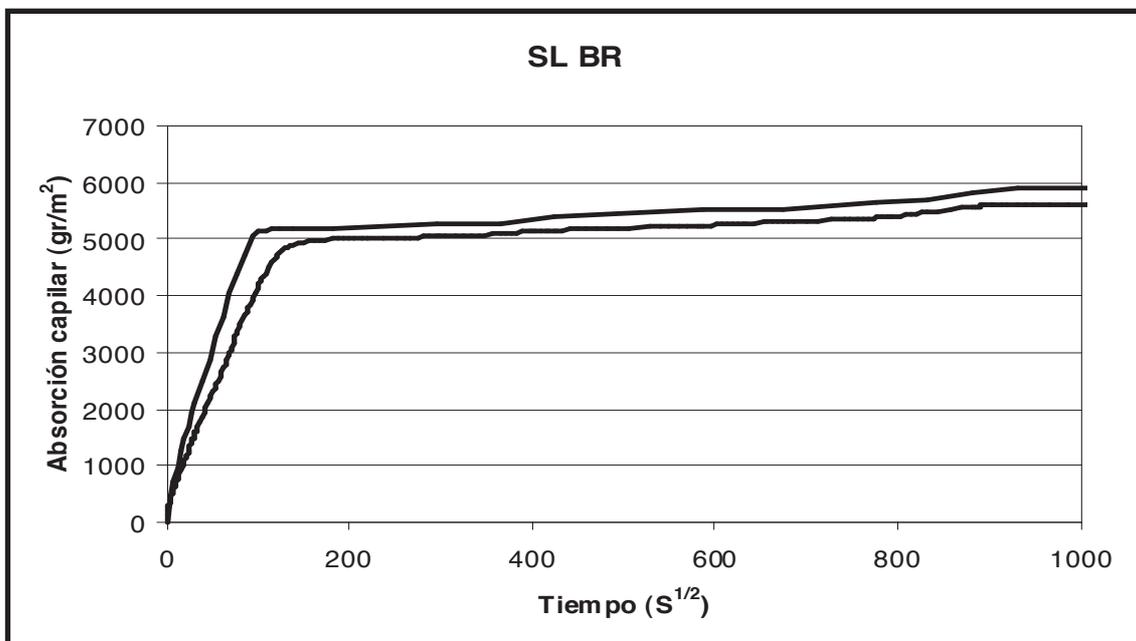
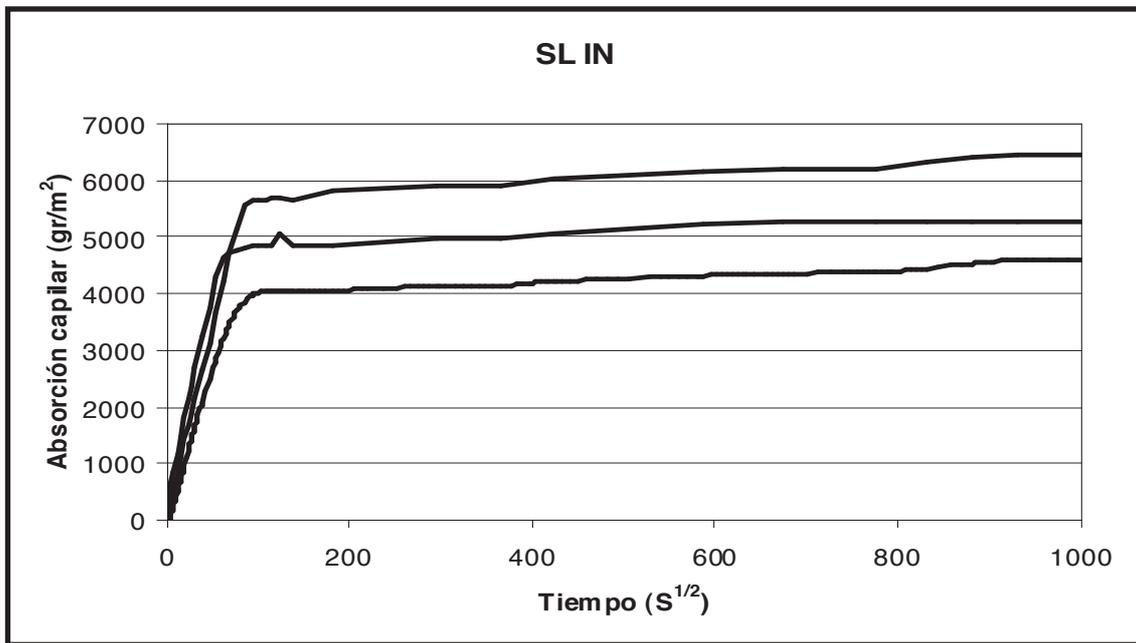


SIGLA: 7-Ay

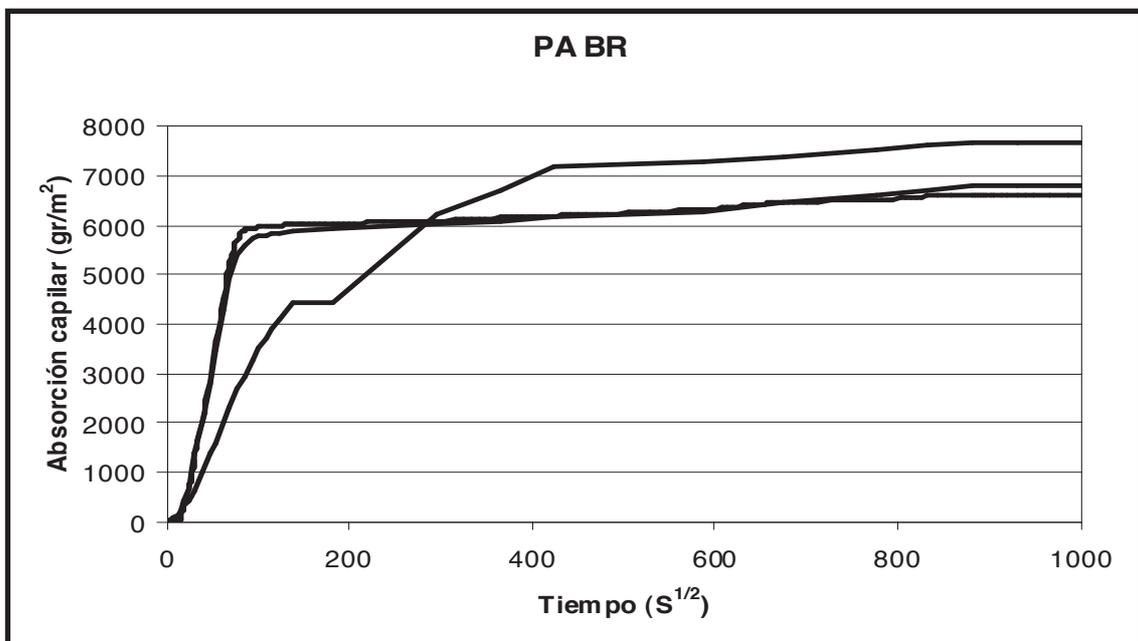
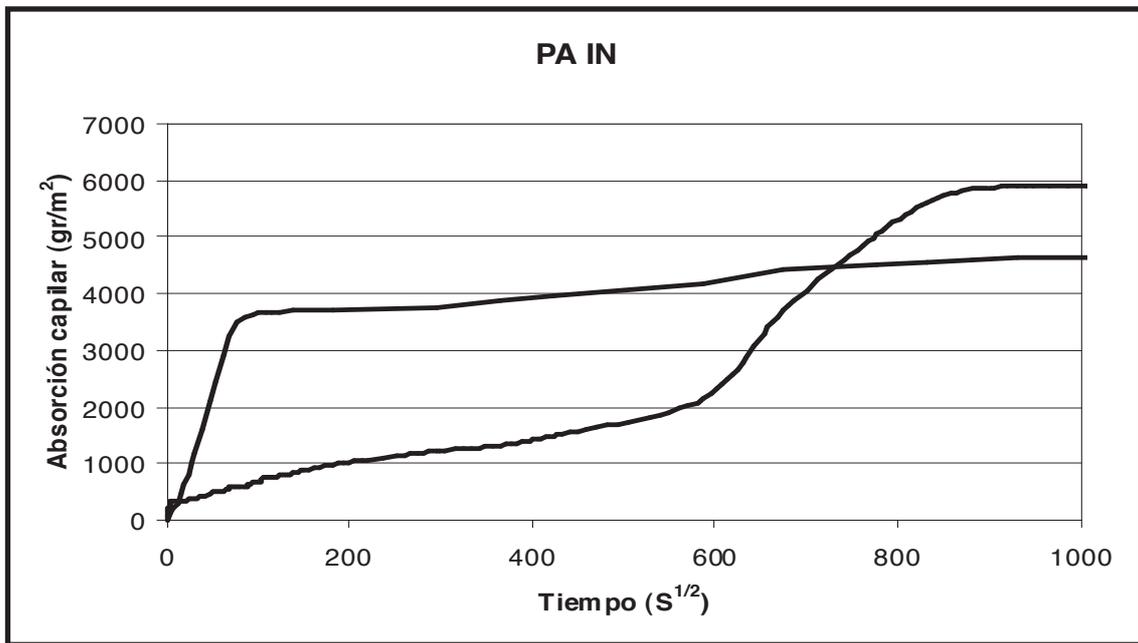
Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.



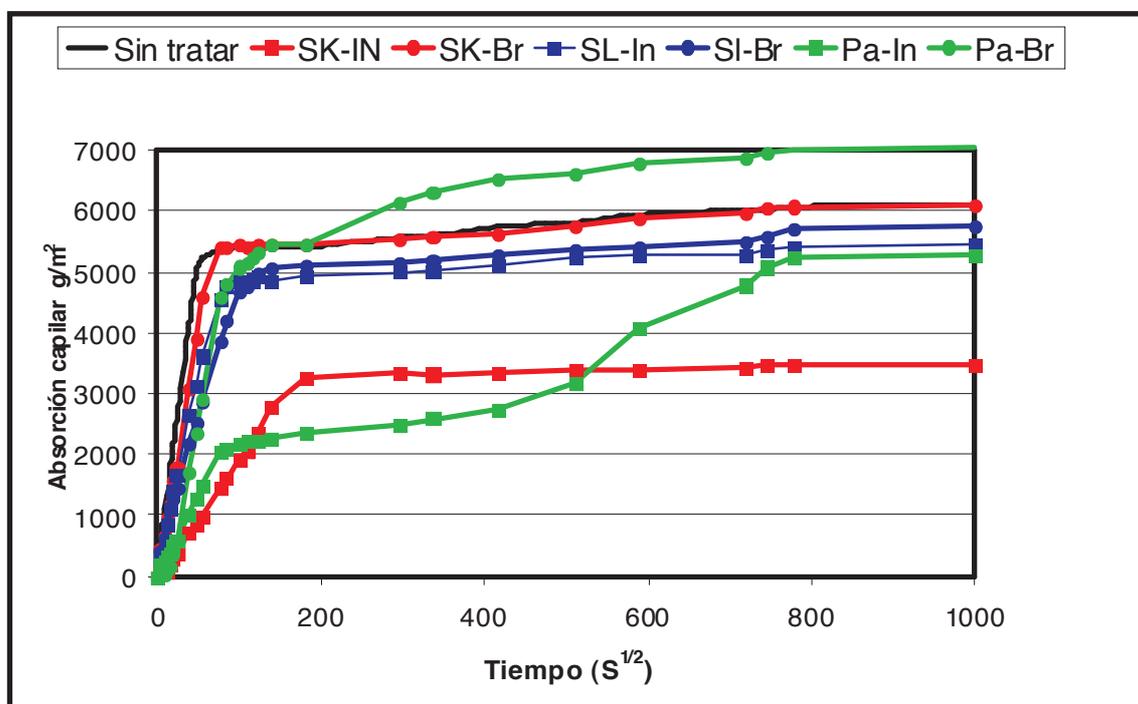
Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.



Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.

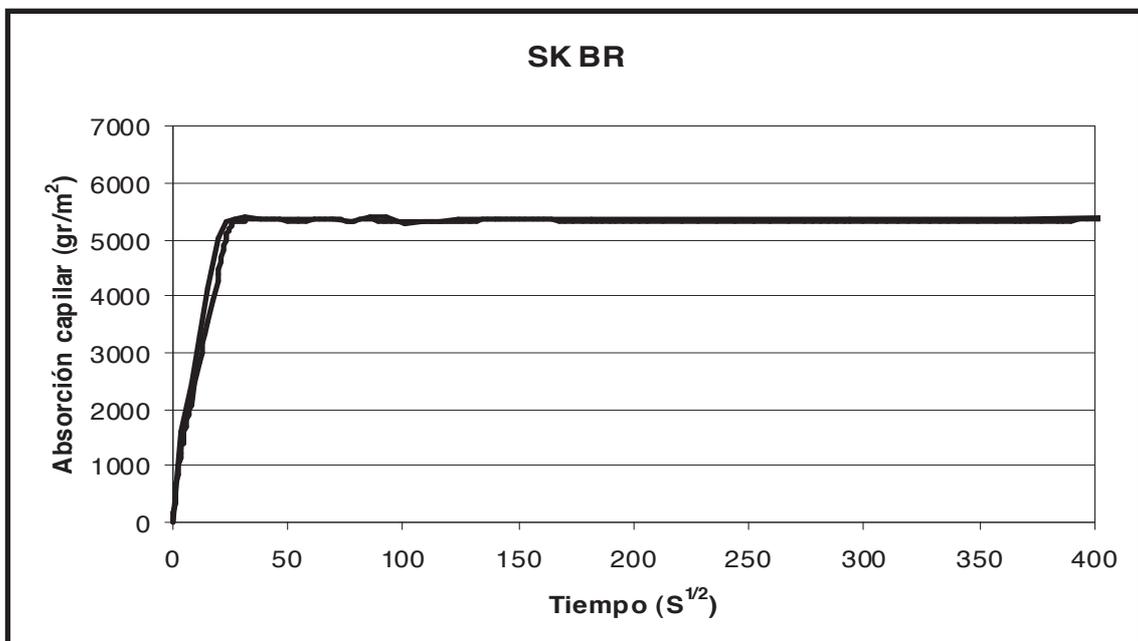
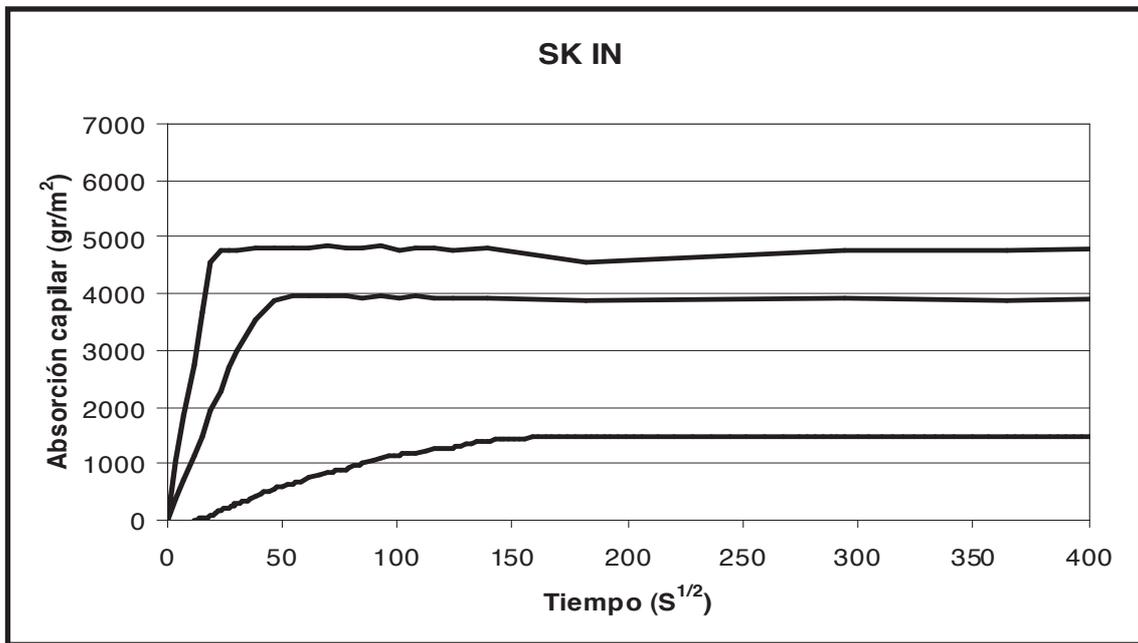


Resumen de la absorción capilar tras aplicar los consolidantes. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

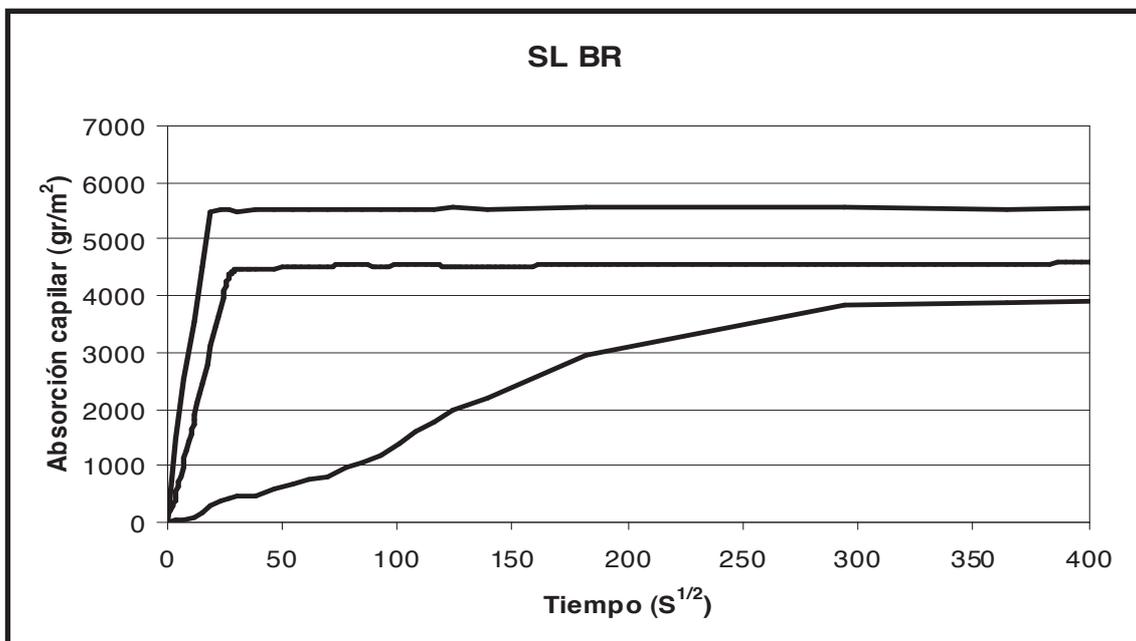
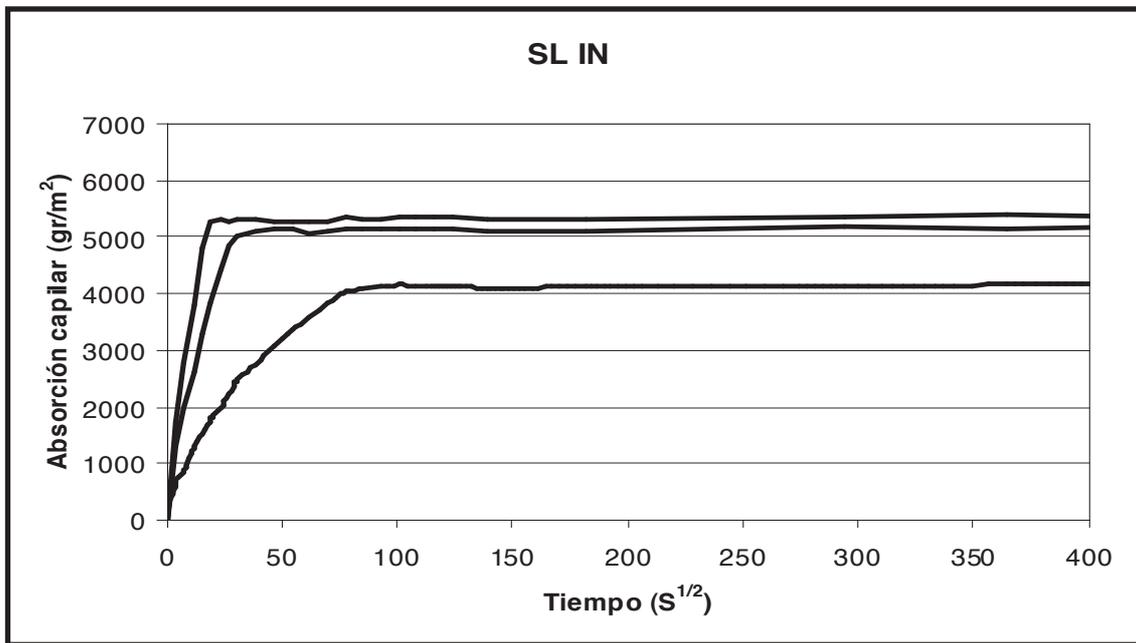


SIGLA: 10-Az

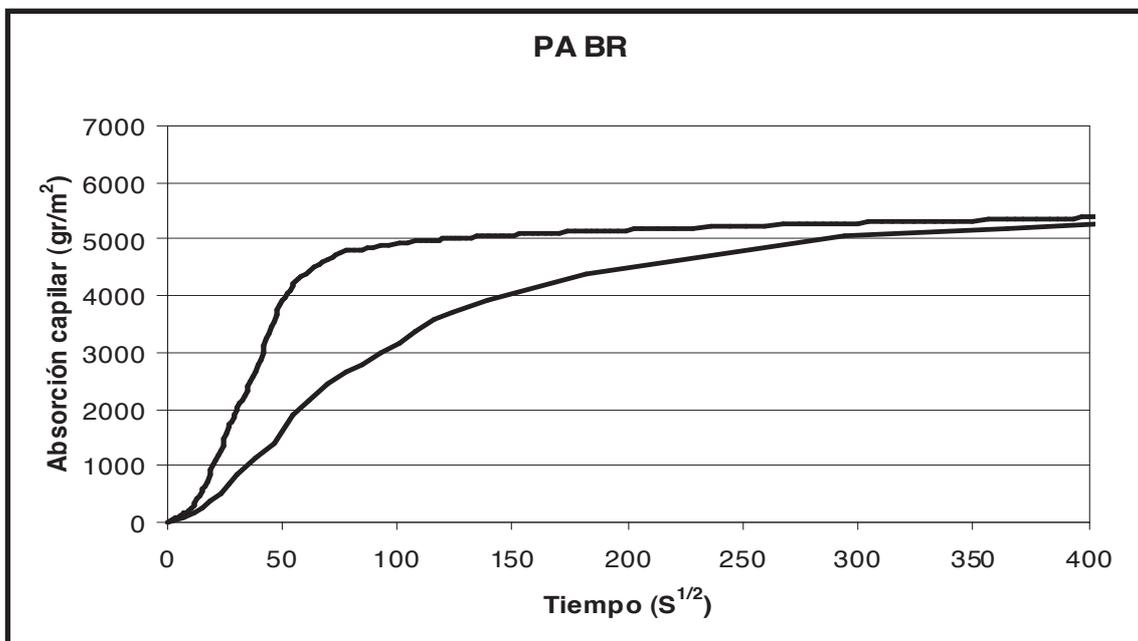
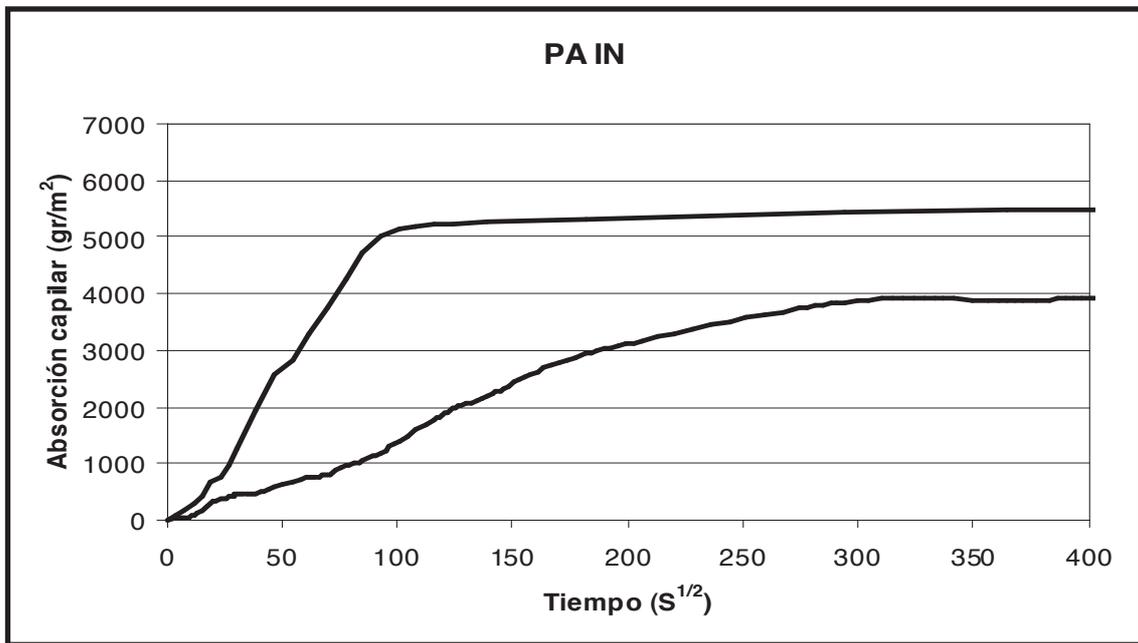
Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.



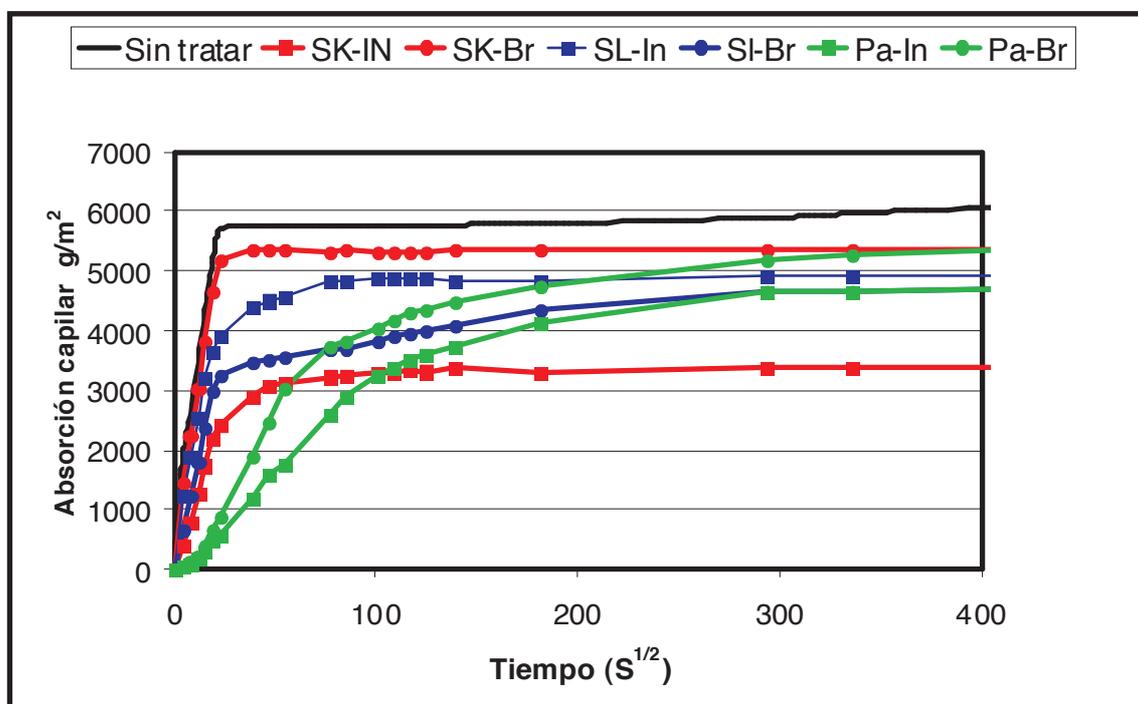
Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.



Absorción capilar tras aplicar los consolidantes.

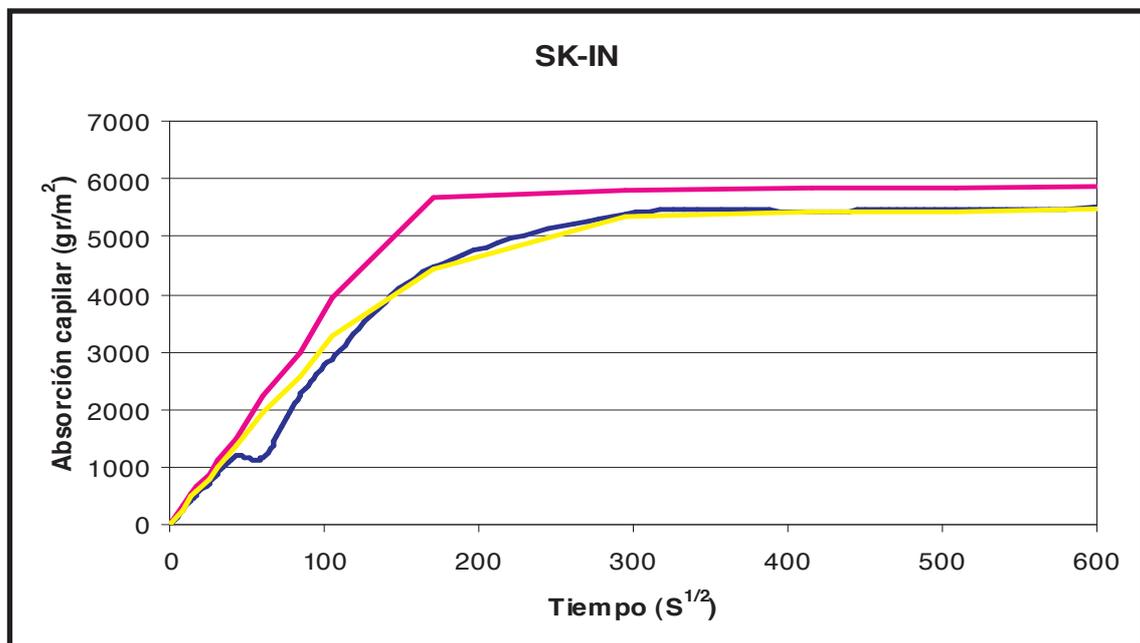


Resumen de la absorción capilar tras aplicar los consolidantes. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

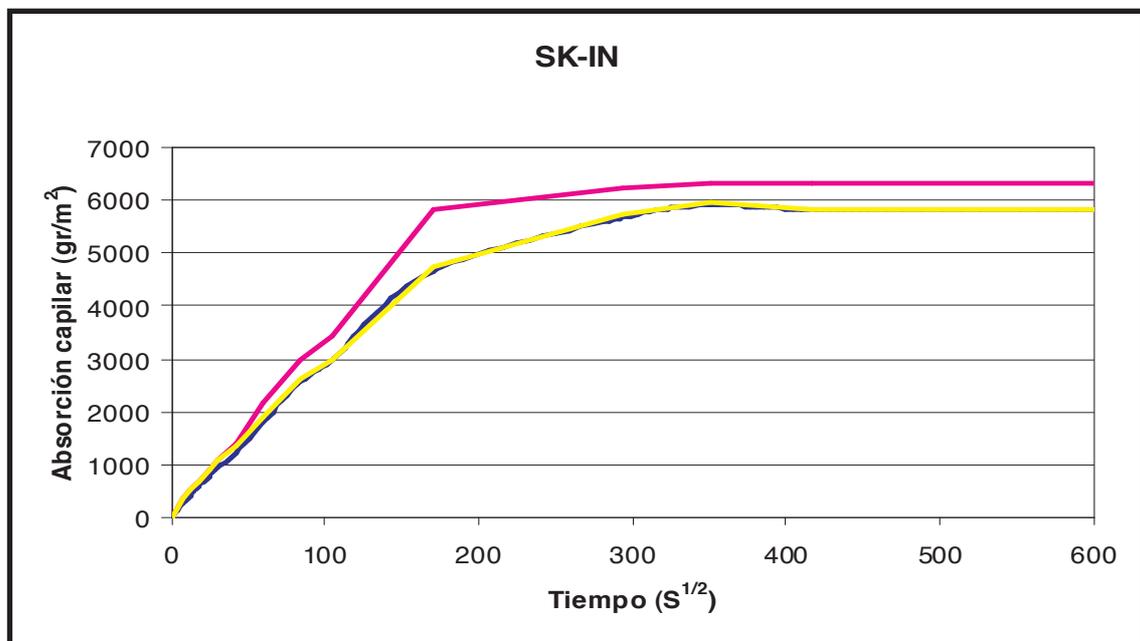


SIGLA: 31-B12

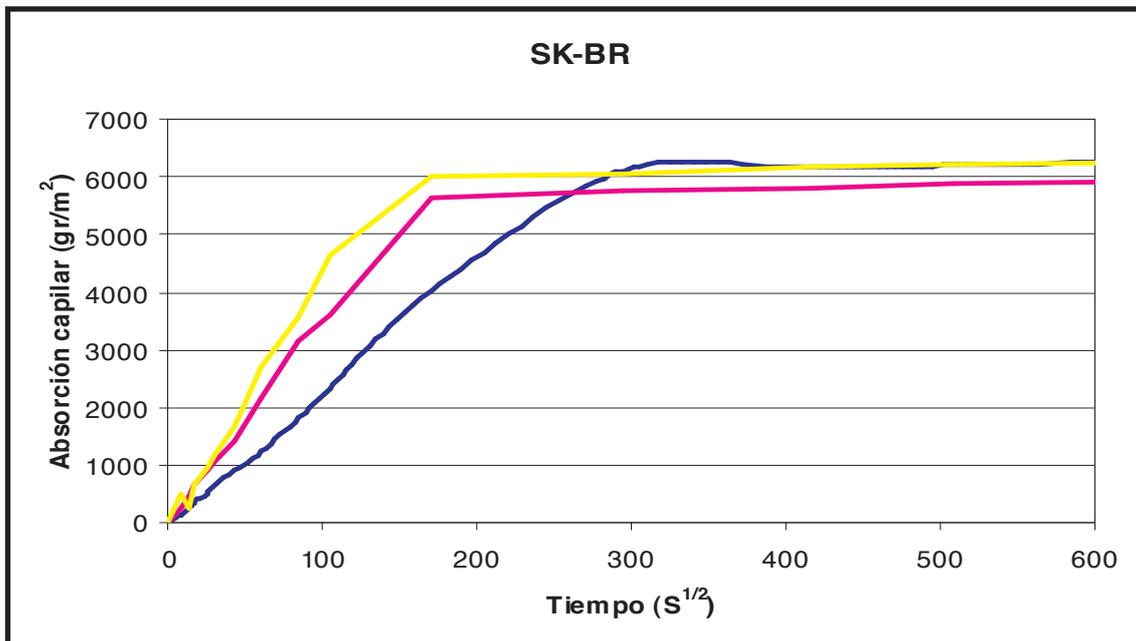
Absorción capilar tras consolidar.



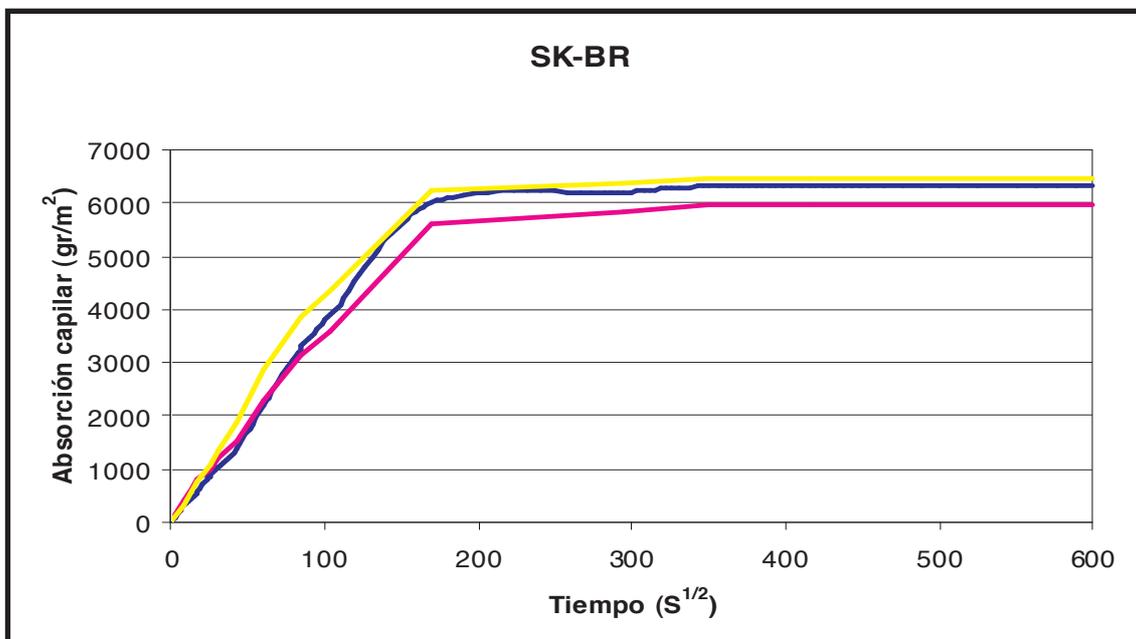
Absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales.



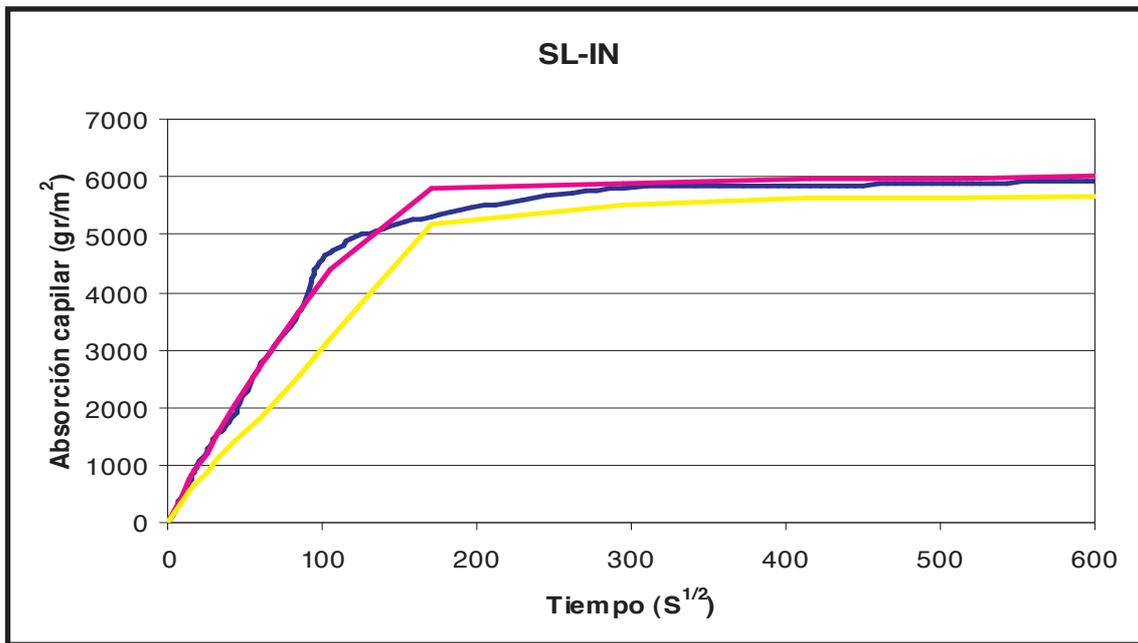
Absorción capilar tras consolidar.



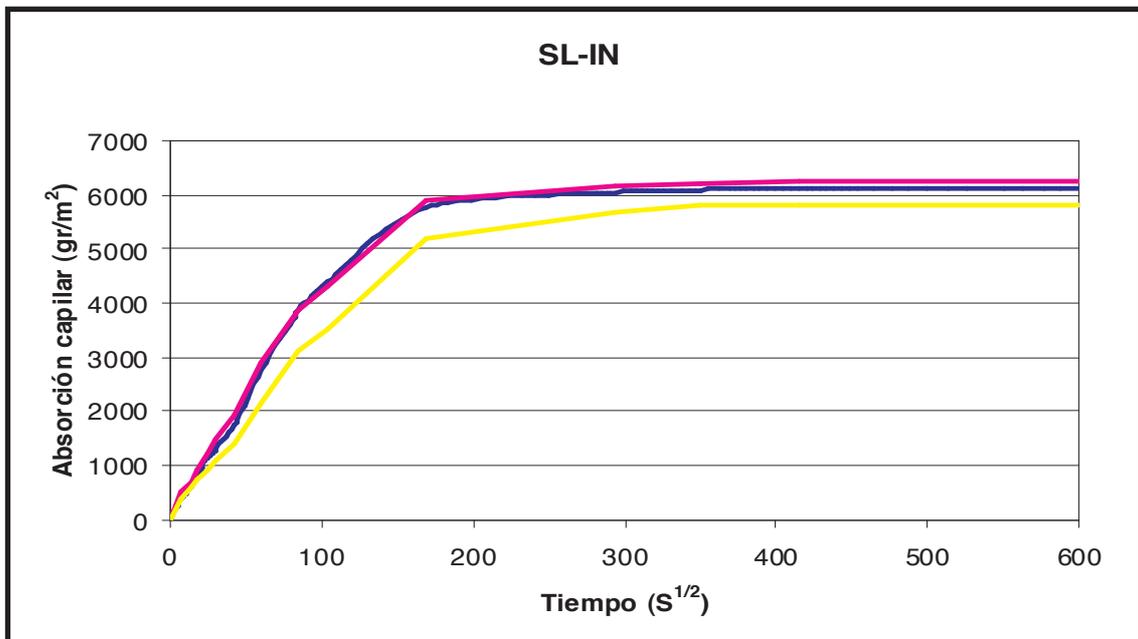
Absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales.



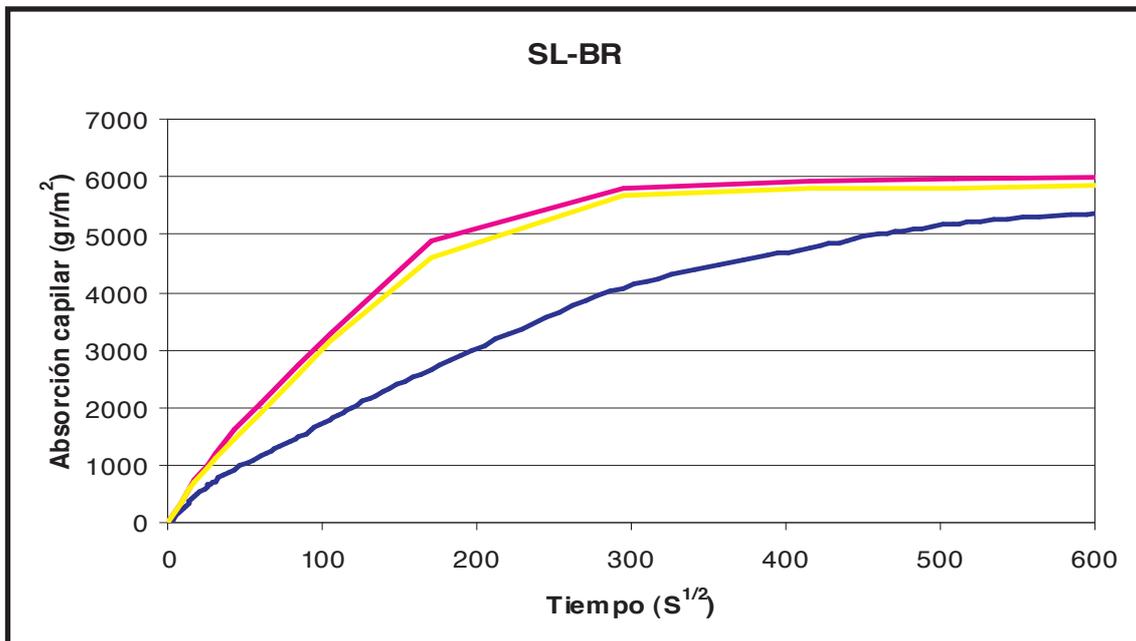
Absorción capilar tras consolidar.



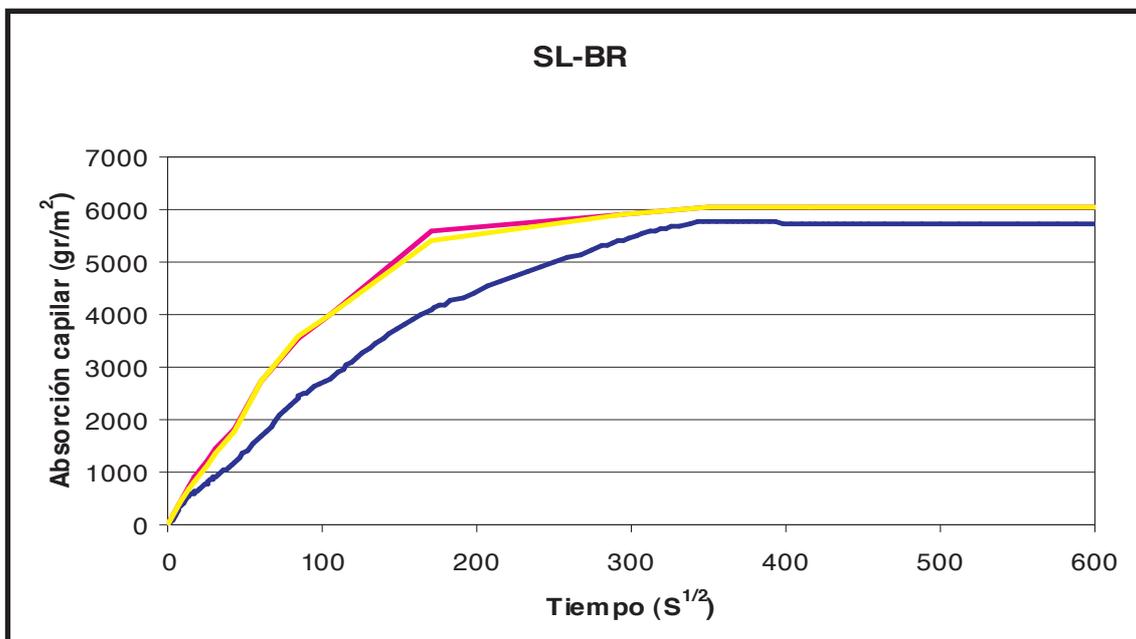
Absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales.



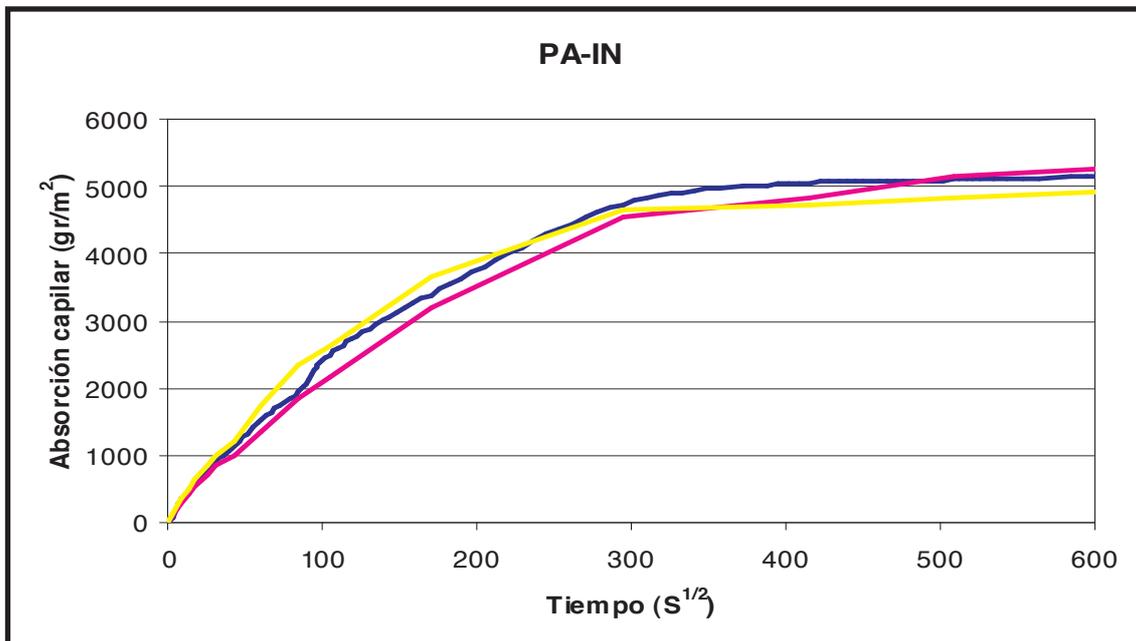
Absorción capilar tras consolidar.



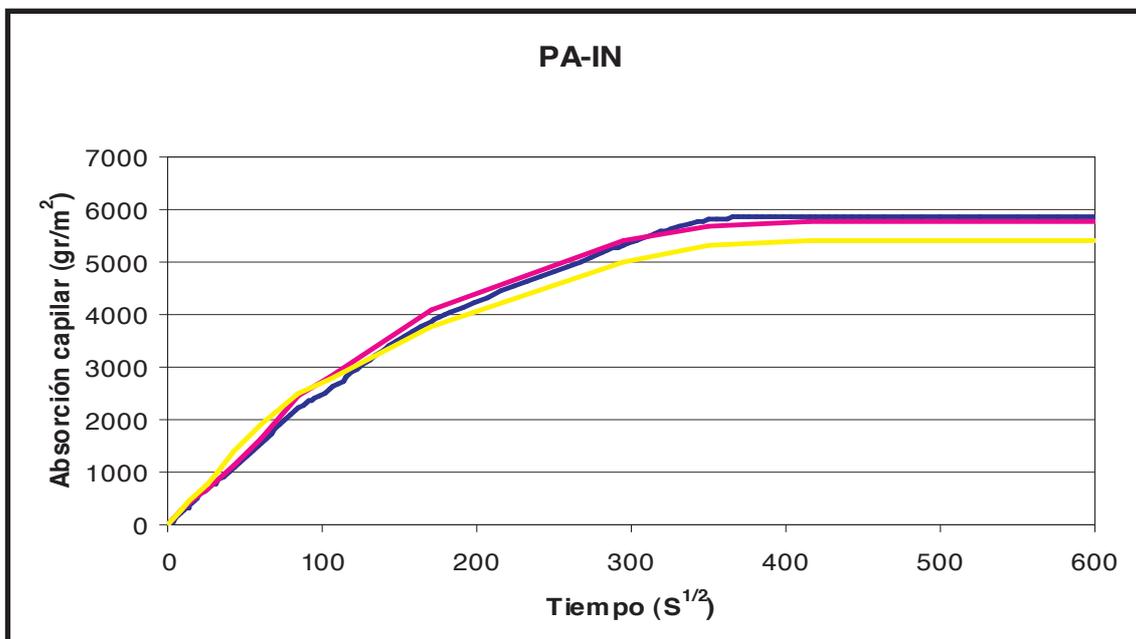
Absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales.



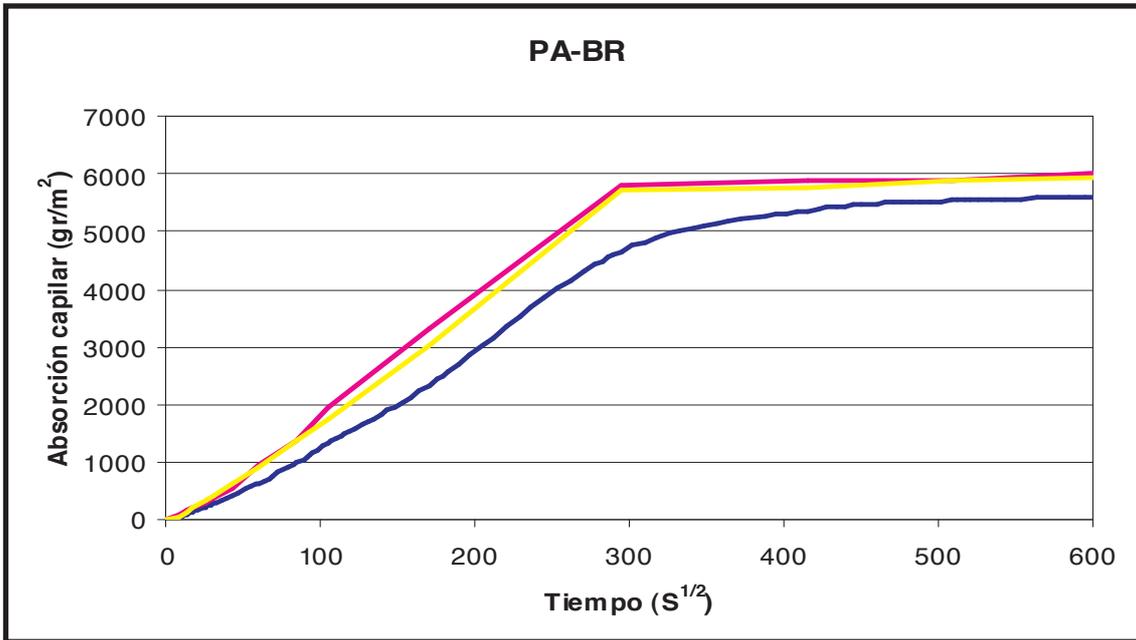
Absorción capilar tras consolidar.



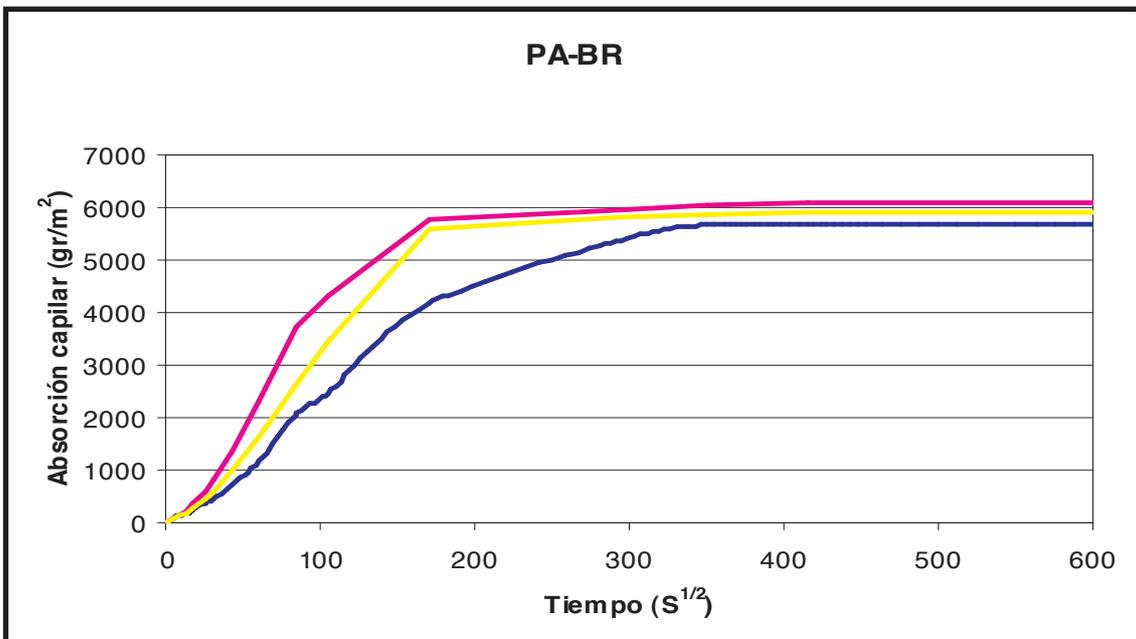
Absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales.



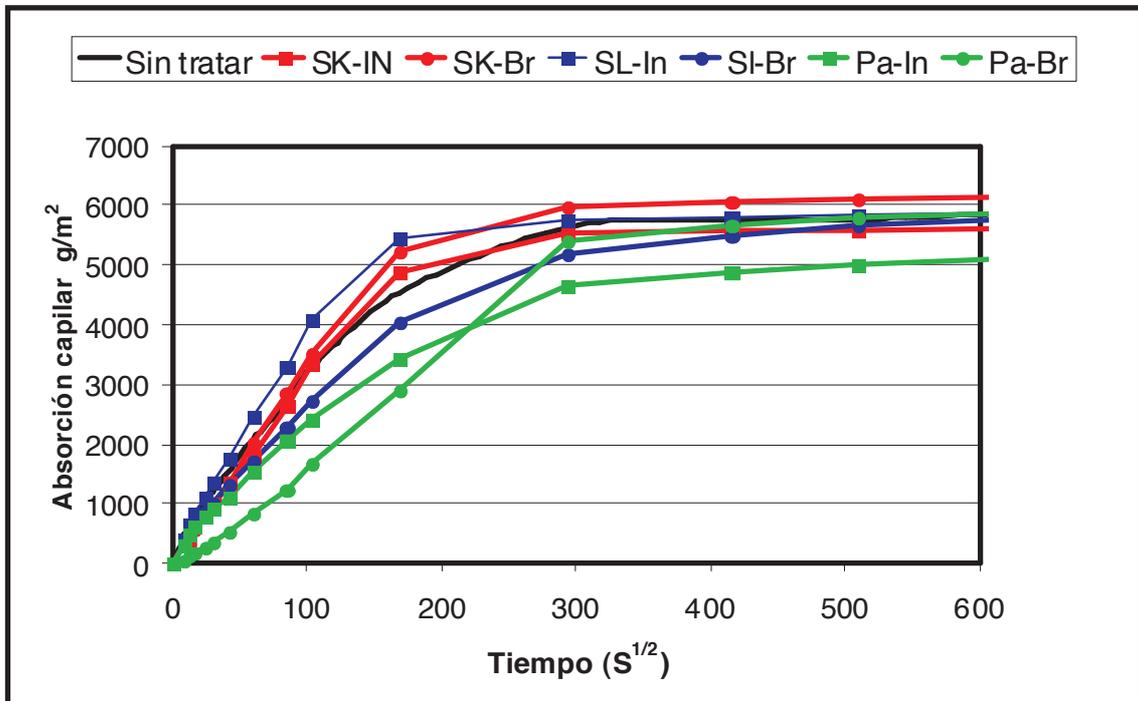
Absorción capilar tras consolidar.



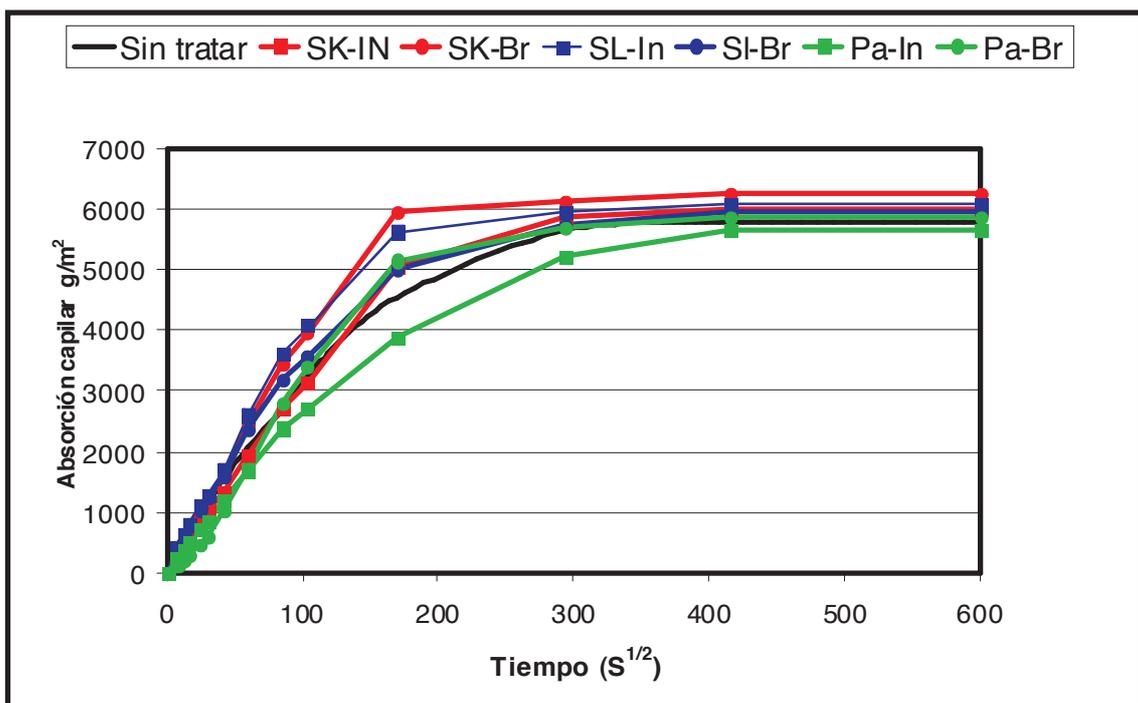
Absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales.



Resumen de la absorción capilar tras aplicar los consolidantes. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.



Resumen de la absorción capilar tras consolidar y realizar el ensayo normalizado de cristalización de sales. Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.



ANEXO 3

Permeabilidad

En este anexo se recogen las fichas de permeabilidad elaboradas para cada una de las rocas caracterizadas antes y después de someter las probetas a la acción de las soluciones salinas de NaCl y de MgSO₄. En estas fichas se muestran los variogramas, mapas de distribución de la permeabilidad e histogramas de frecuencia para cada una de las dos caras caracterizadas en cada roca.

Sigla: 12-Ca

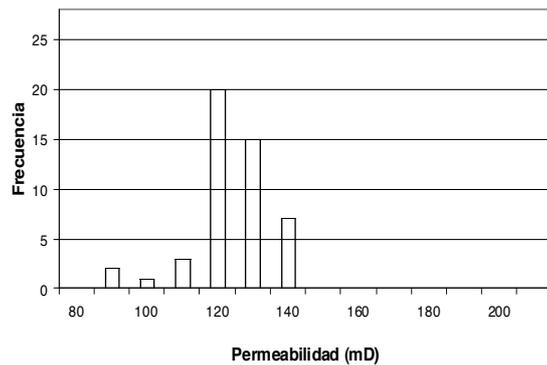
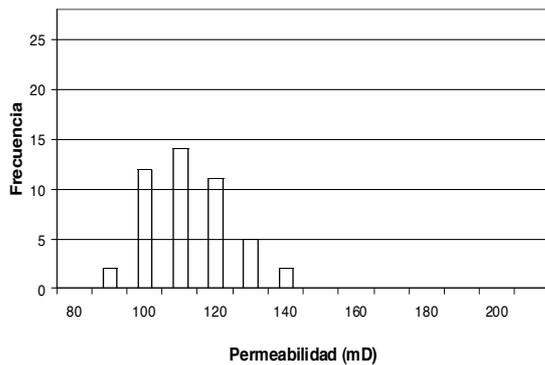
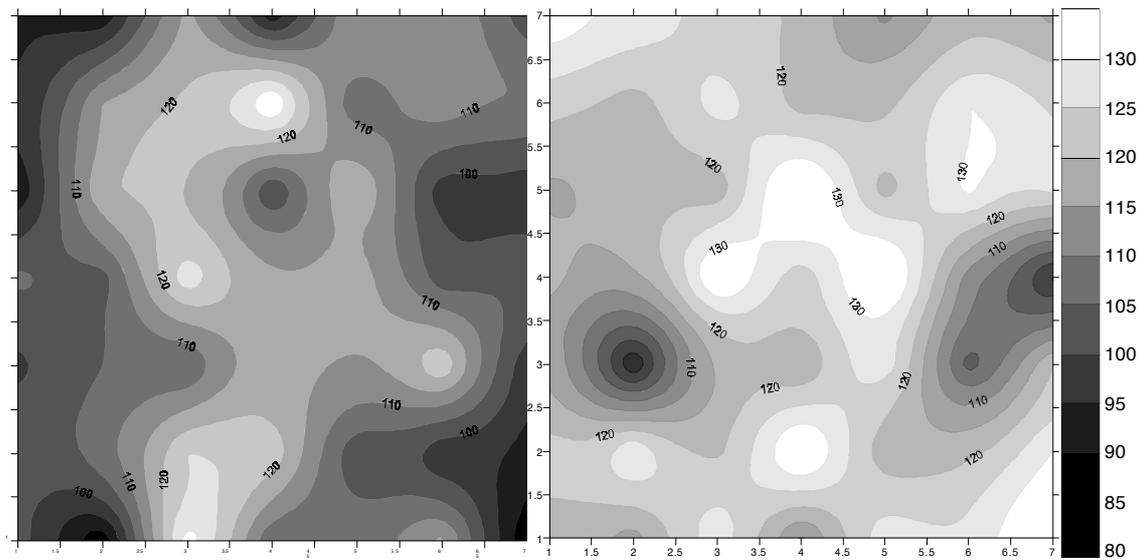
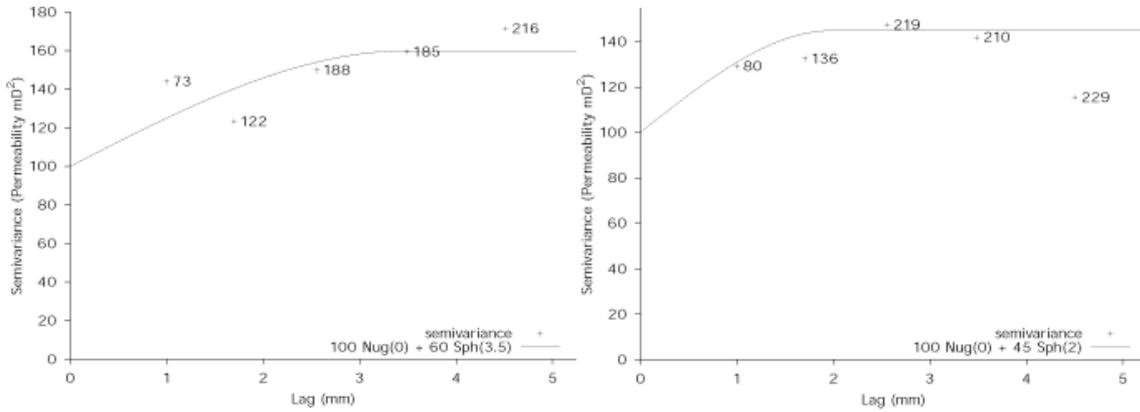
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 107,39 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 120,05 mD.



Sigla: 12-Ca

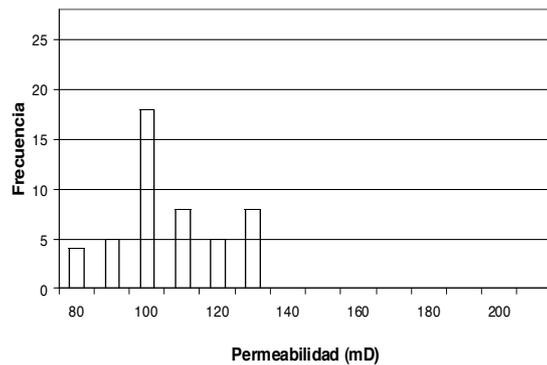
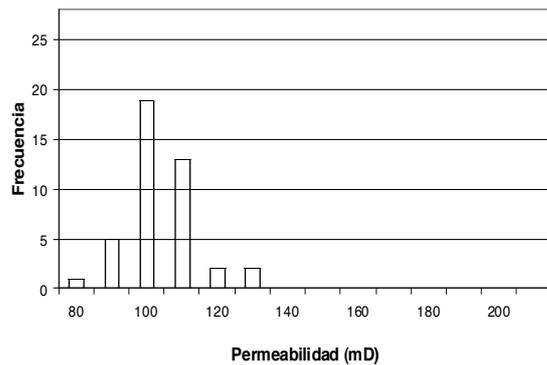
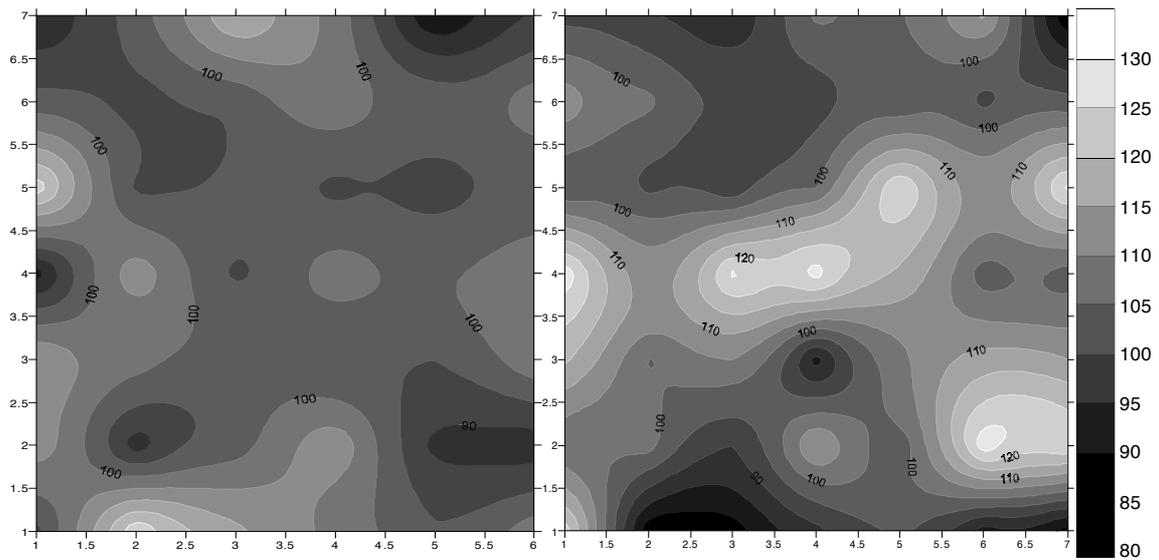
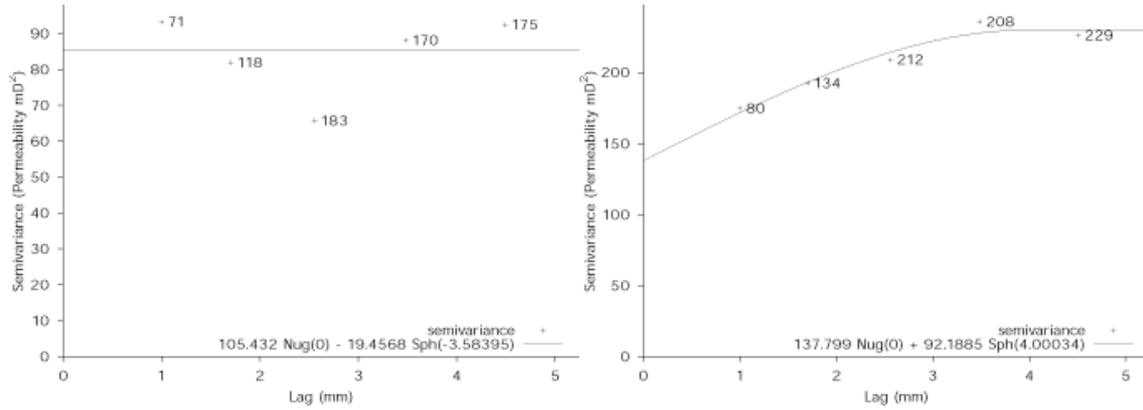
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 99,07 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 101,54 mD.



Sigla: 12-Ca

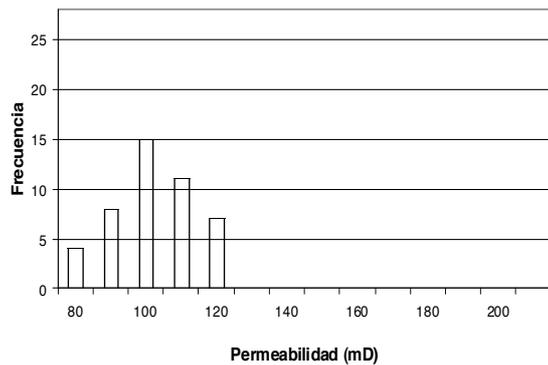
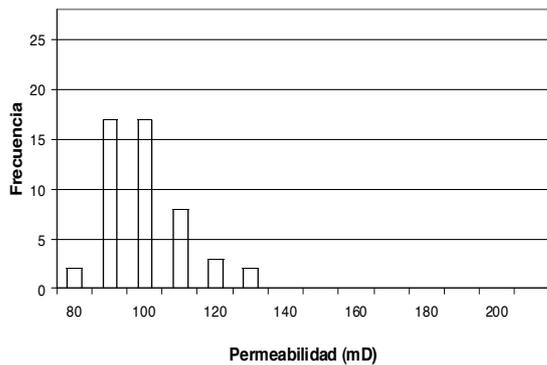
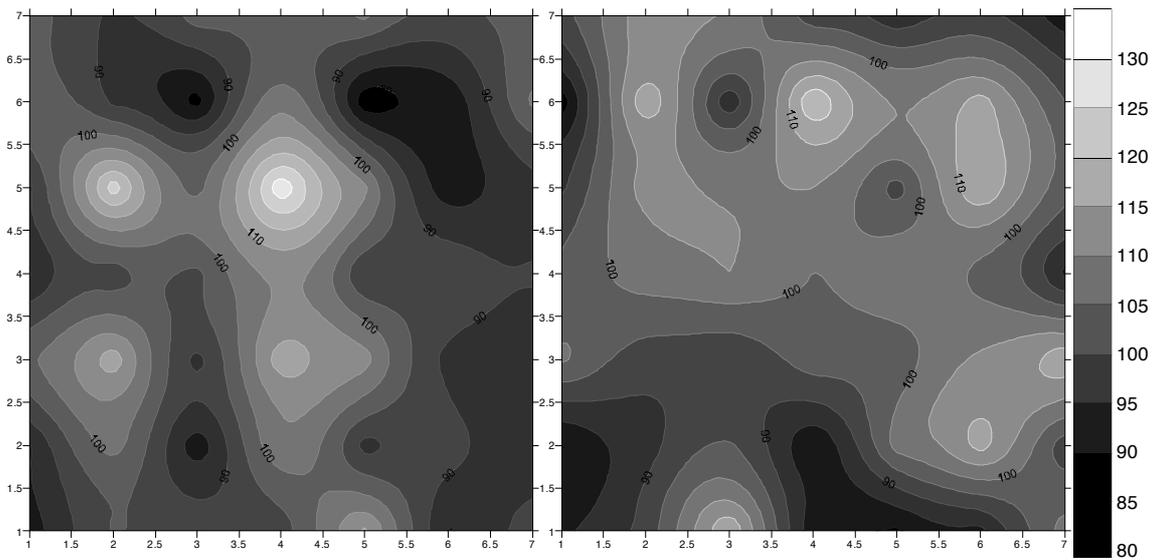
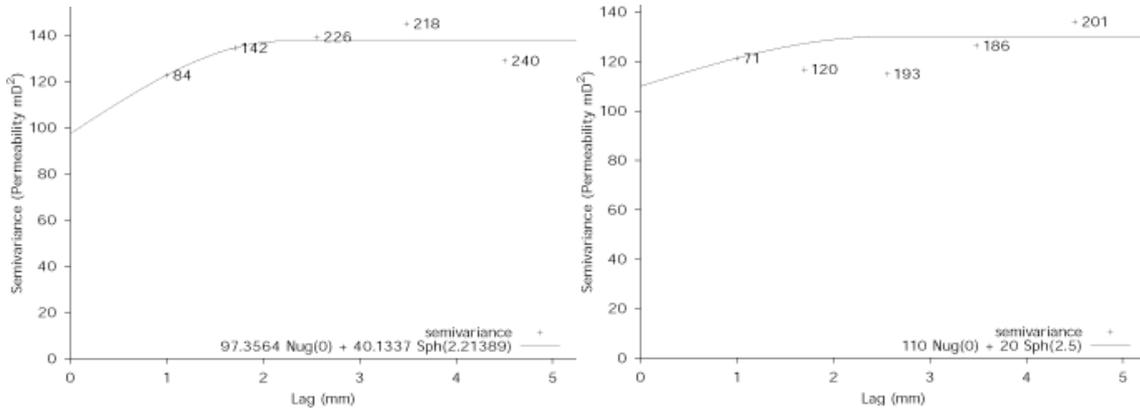
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Permeabilidad: 94,96 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 96,83 mD.



Sigla: 13-Pu

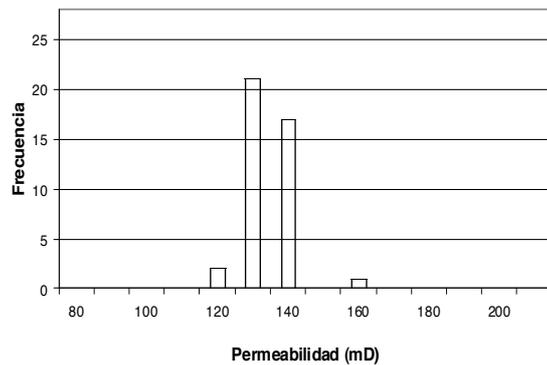
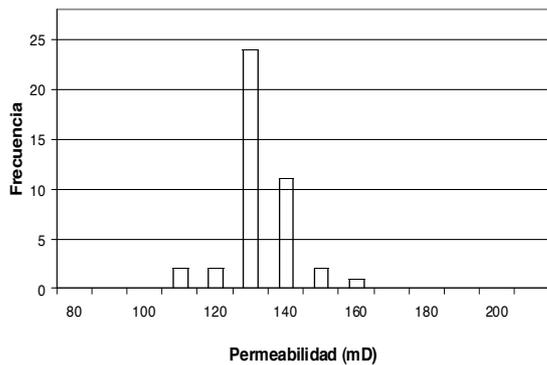
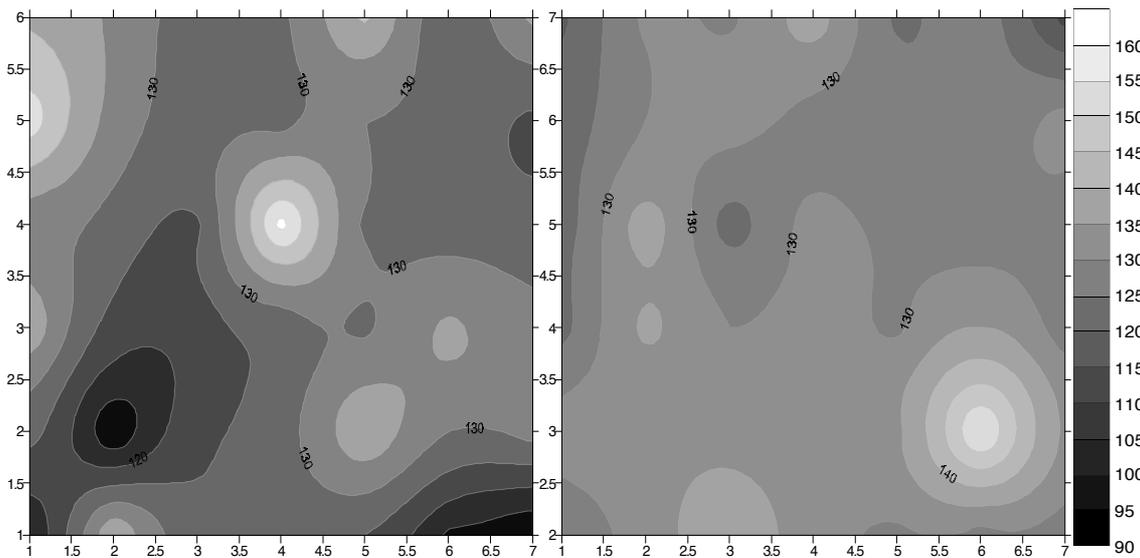
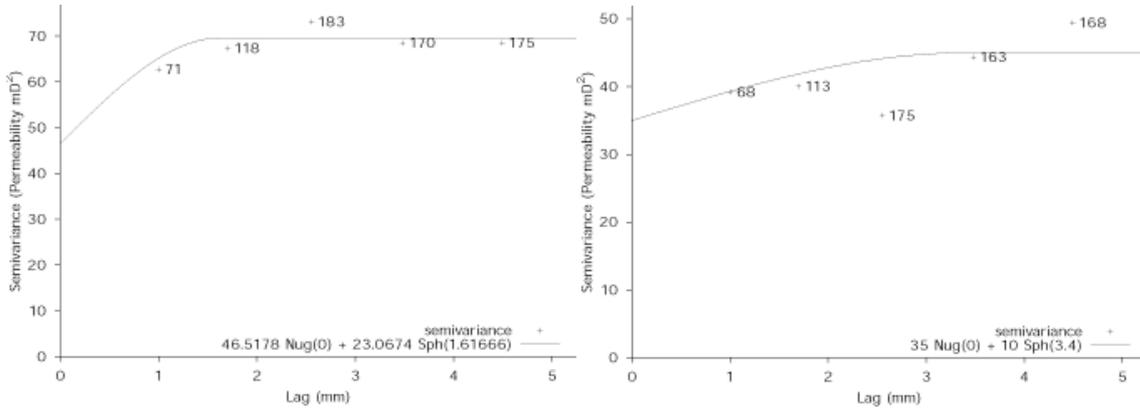
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 129,07 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 129,92 mD.



Sigla: 13-Pu

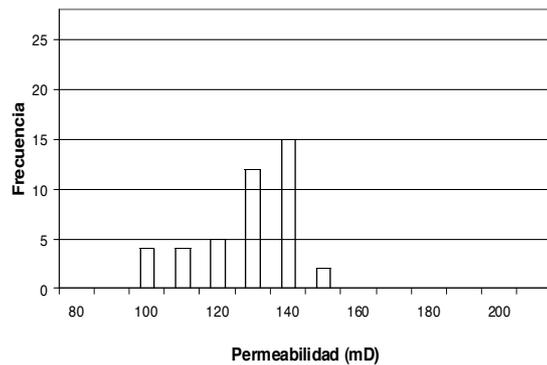
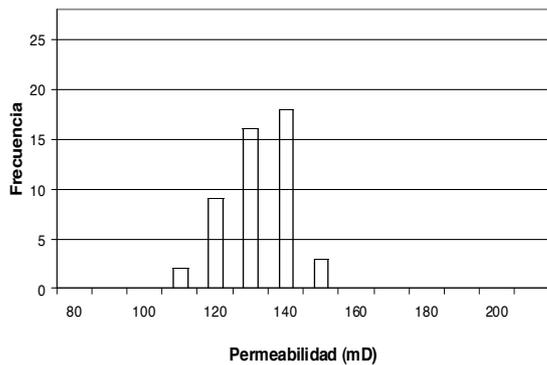
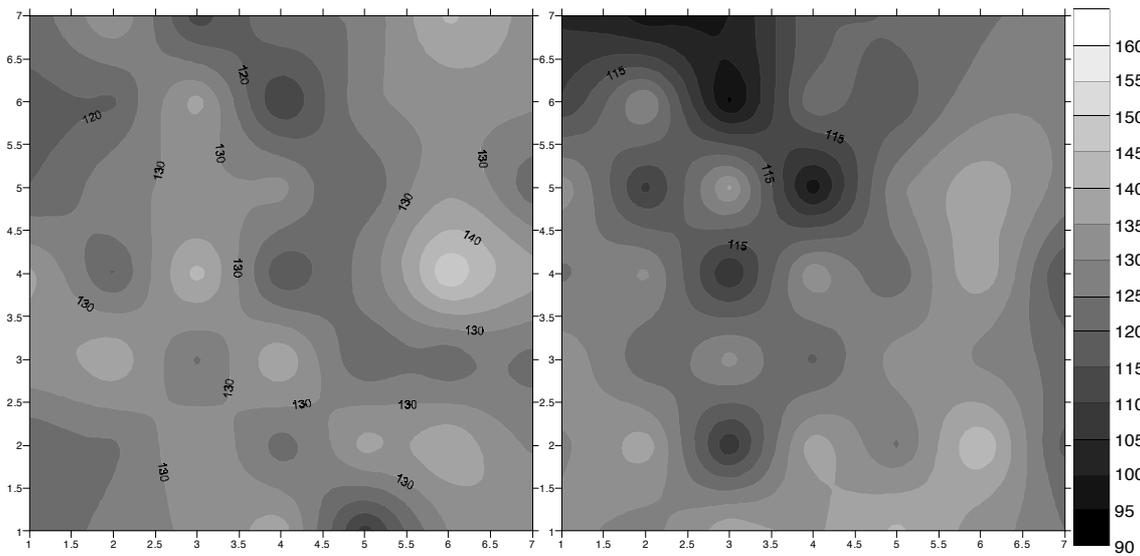
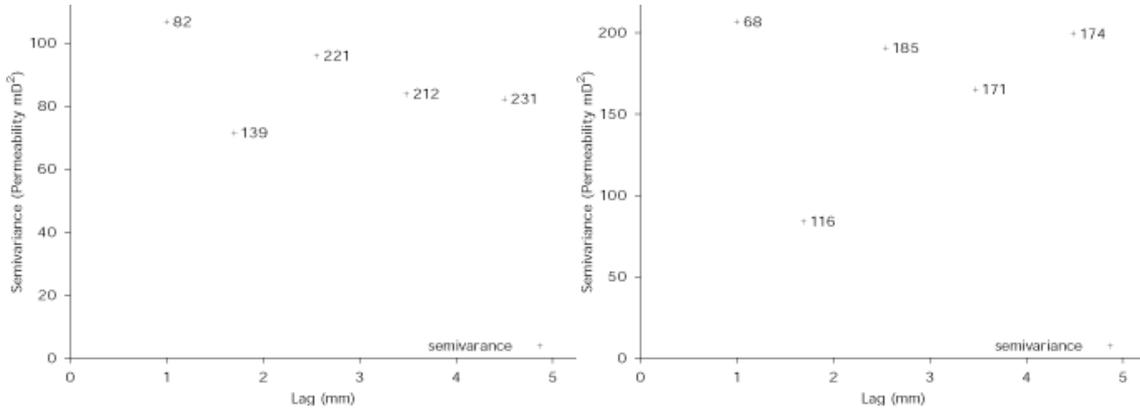
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 128,25 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 124,01 mD.



Sigla: 13-Pu

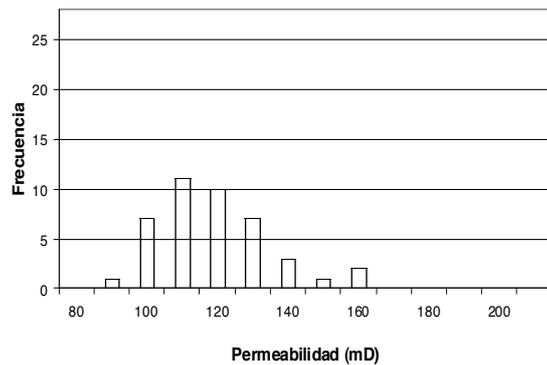
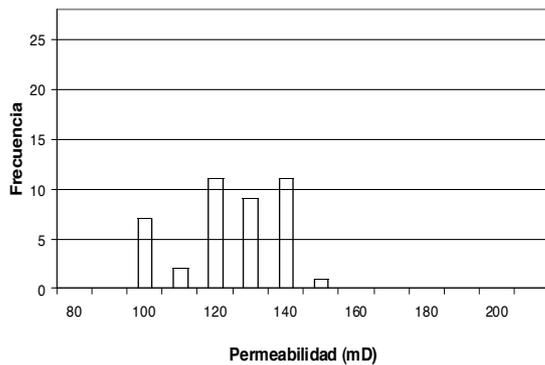
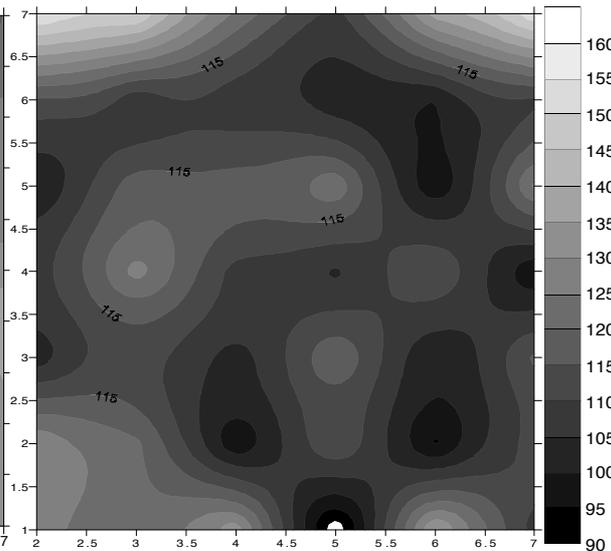
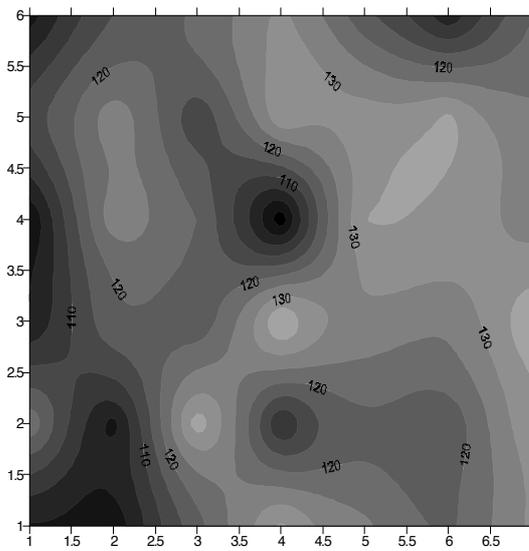
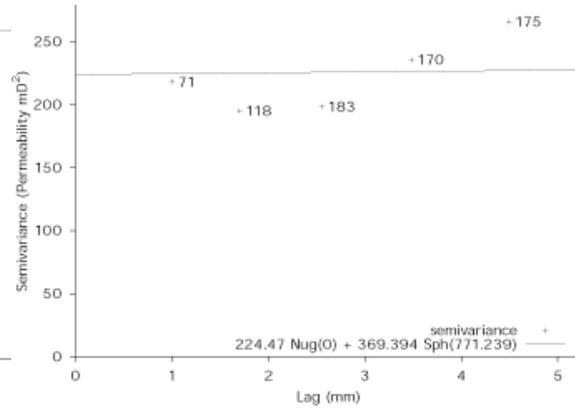
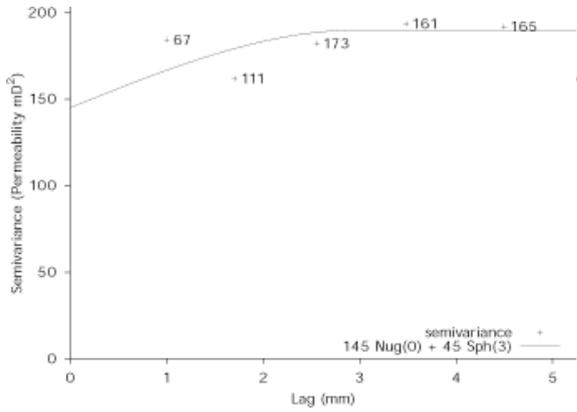
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 120,02 mD.

Permeabilidad: 115,06 mD.



Sigla: 16-VI-I

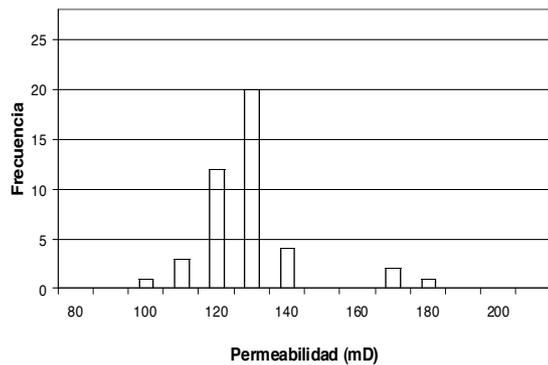
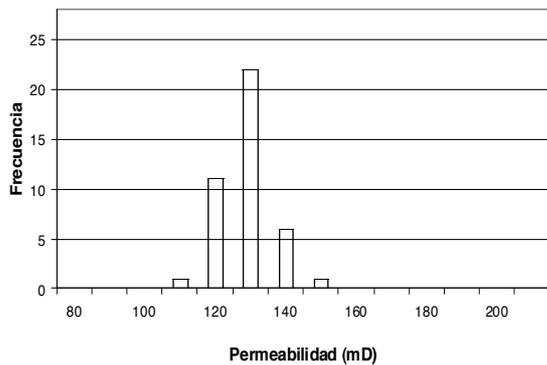
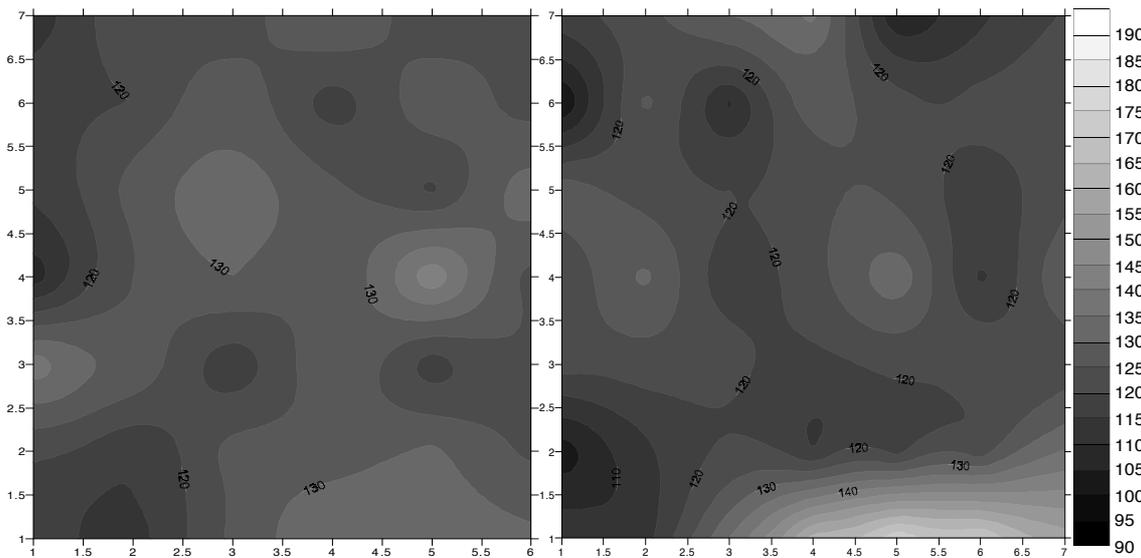
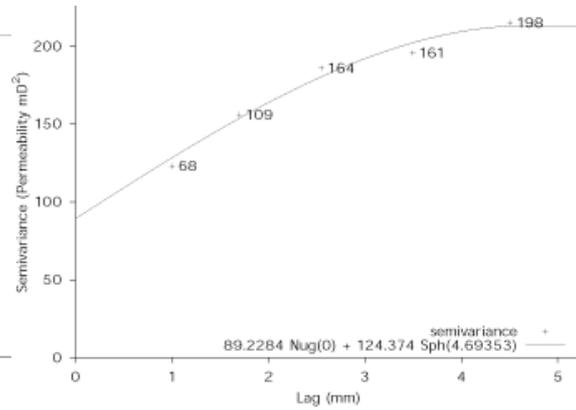
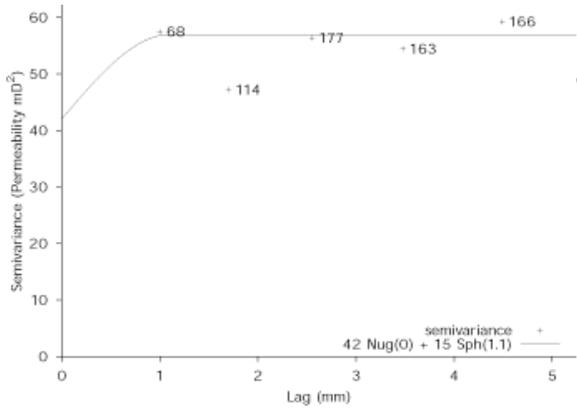
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 124,41 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 124,03 mD.



Sigla: 16-VI-I

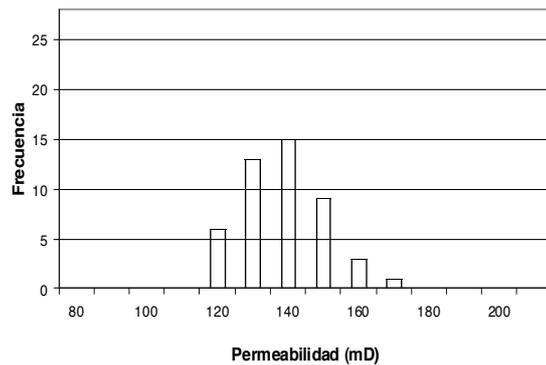
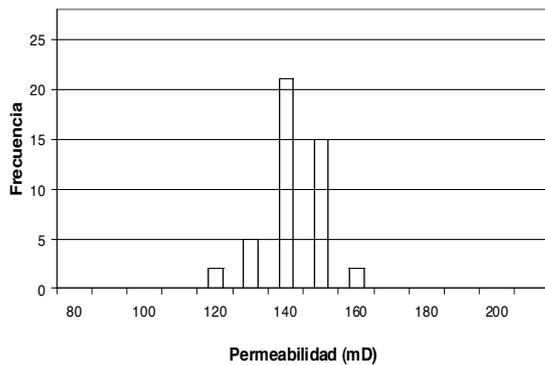
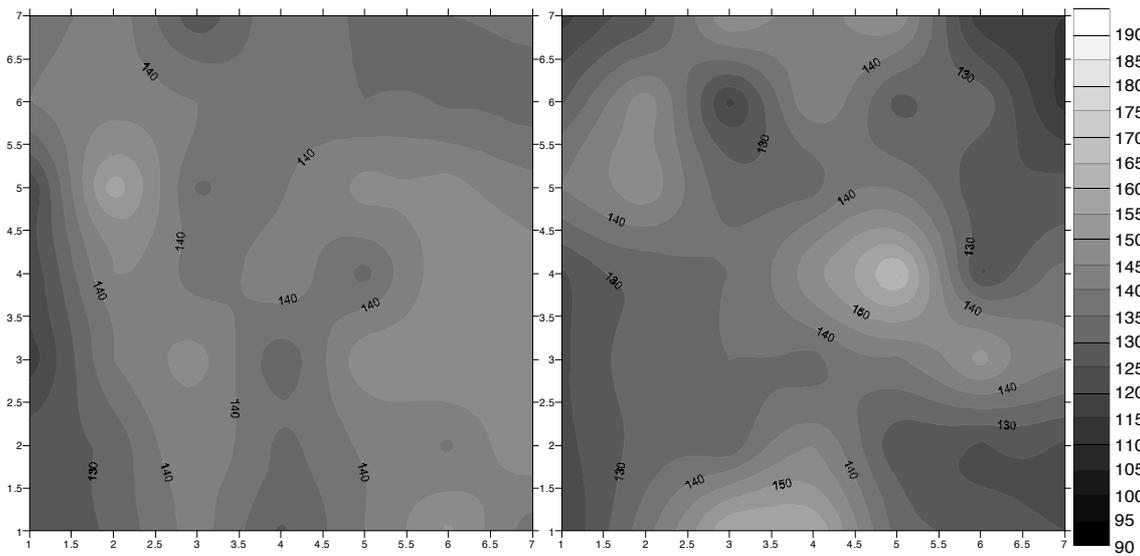
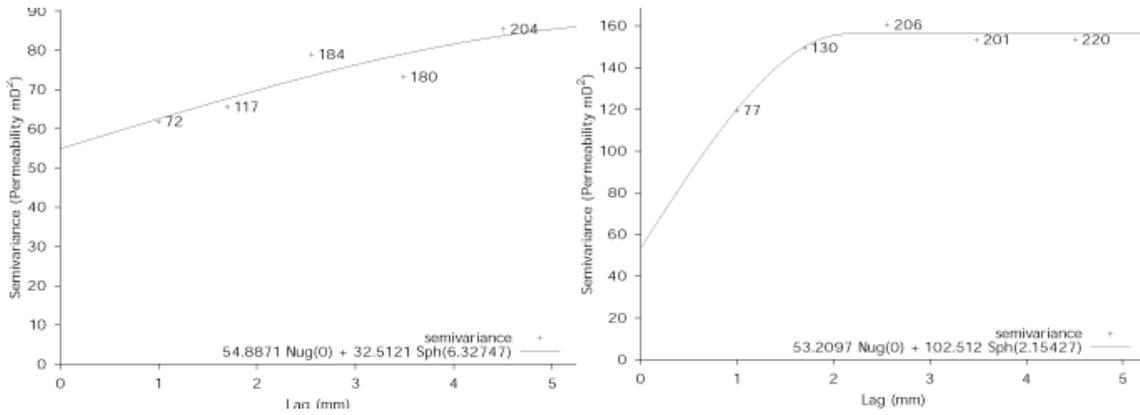
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 138,02 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 134,29 mD.



Sigla:16-VI-I

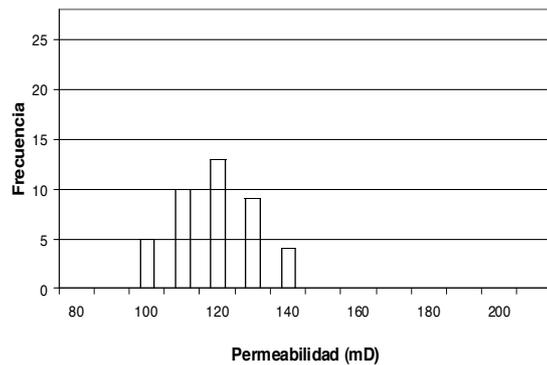
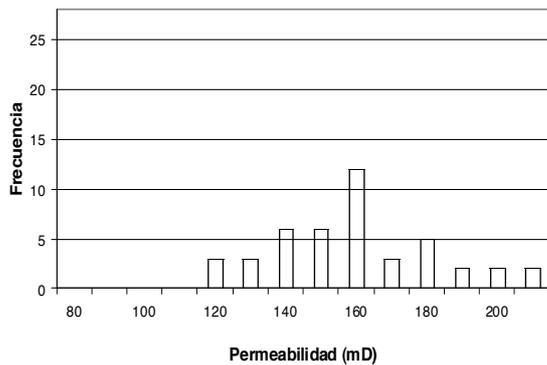
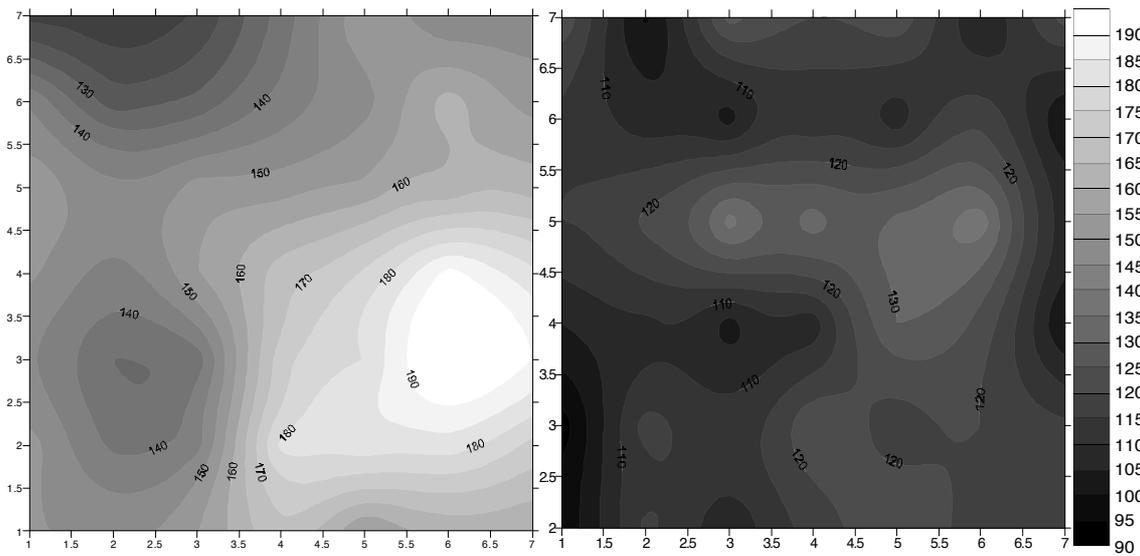
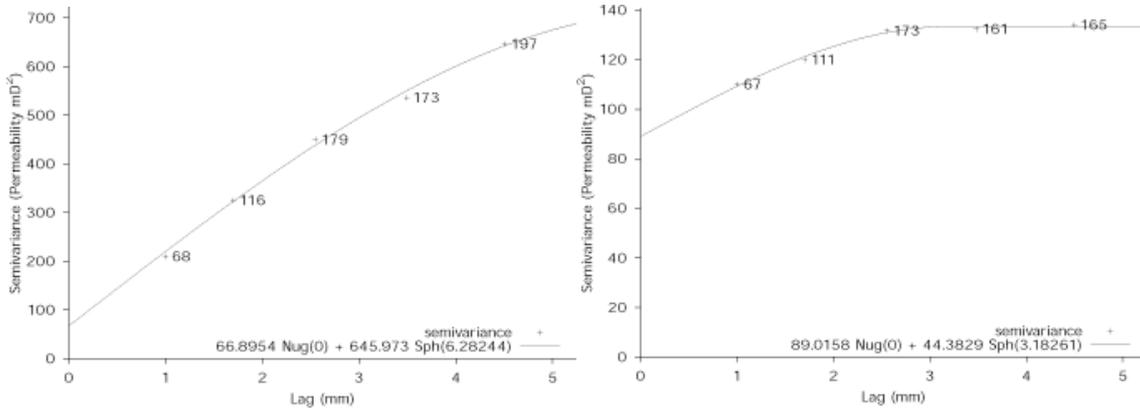
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 154,59 mD.

Permeabilidad: 115,12 mD.



Sigla: 28-Crt

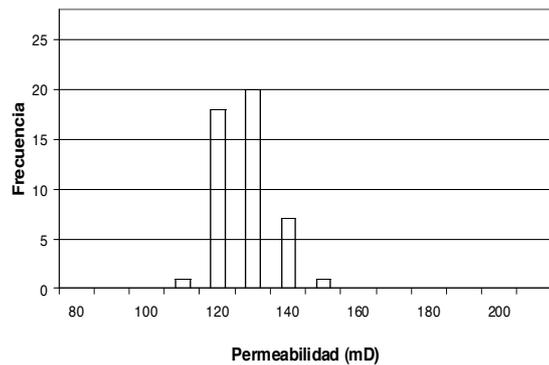
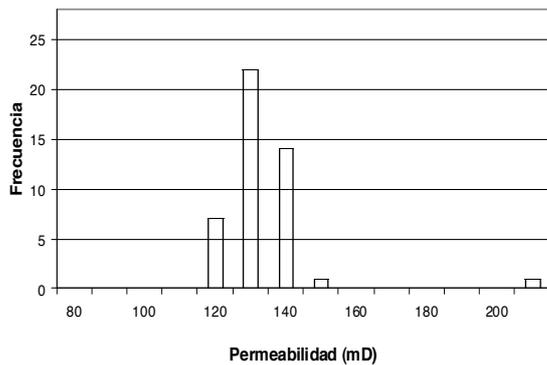
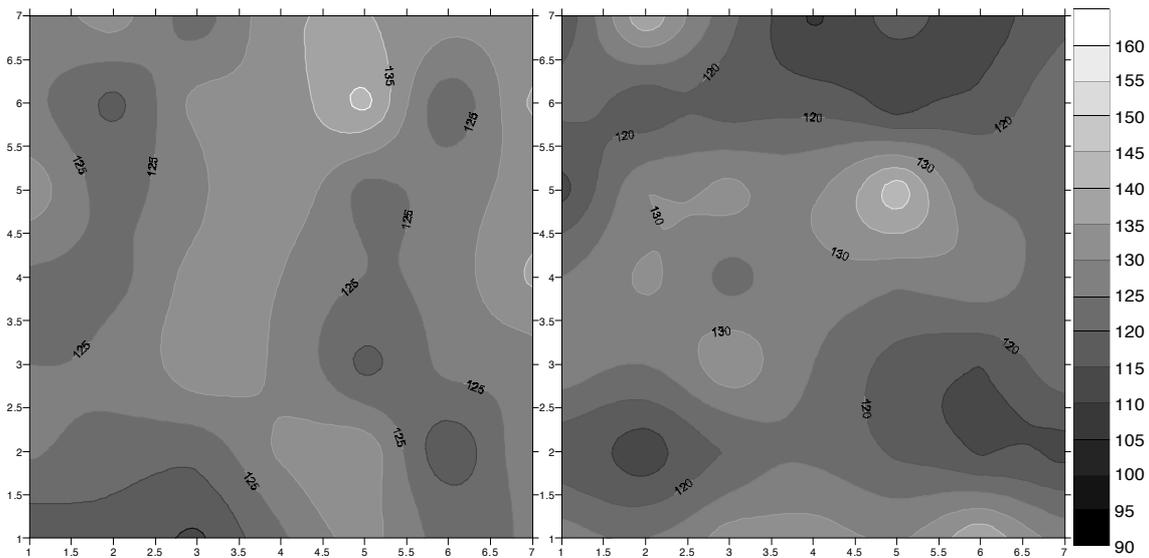
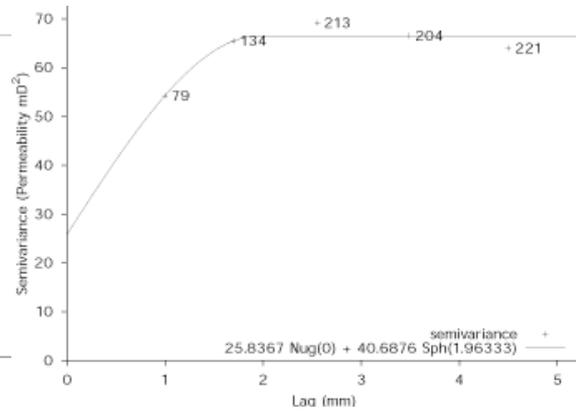
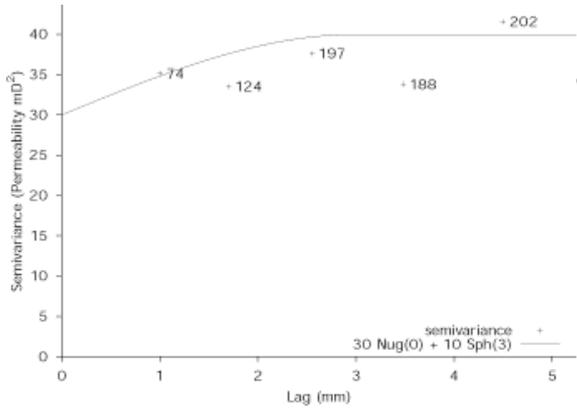
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 126,97 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 123,32 mD.



Sigla: 28-Crt

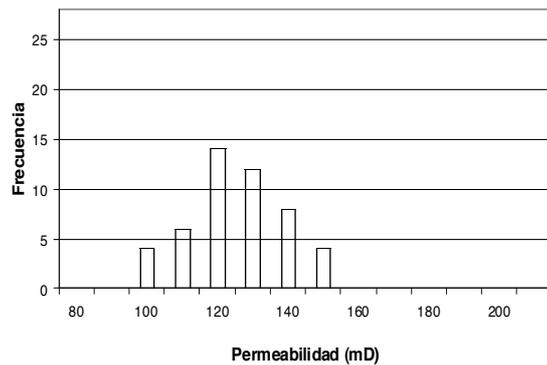
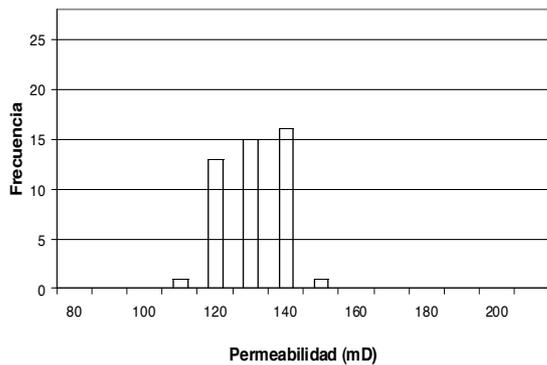
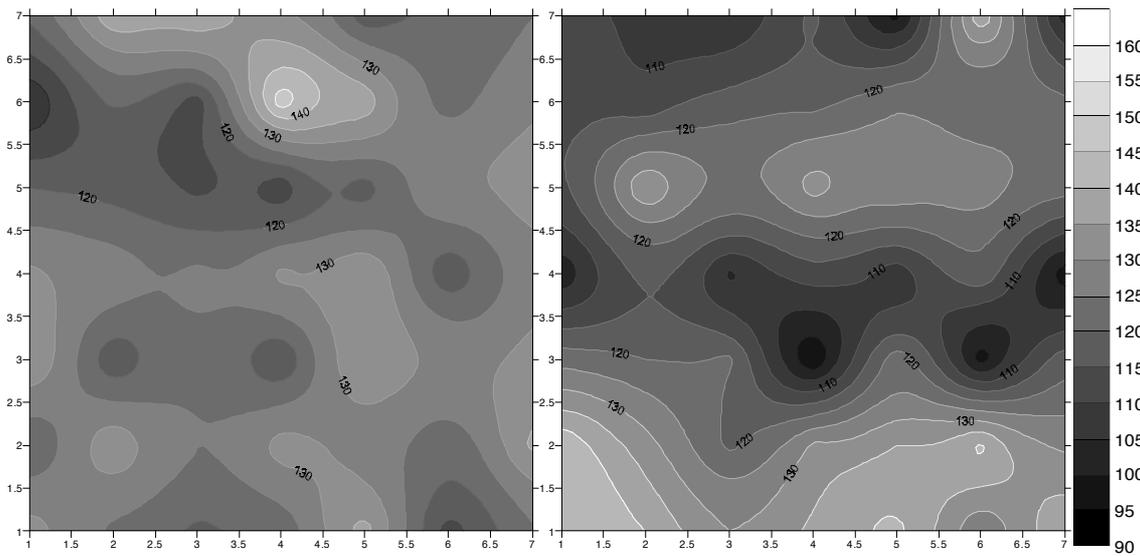
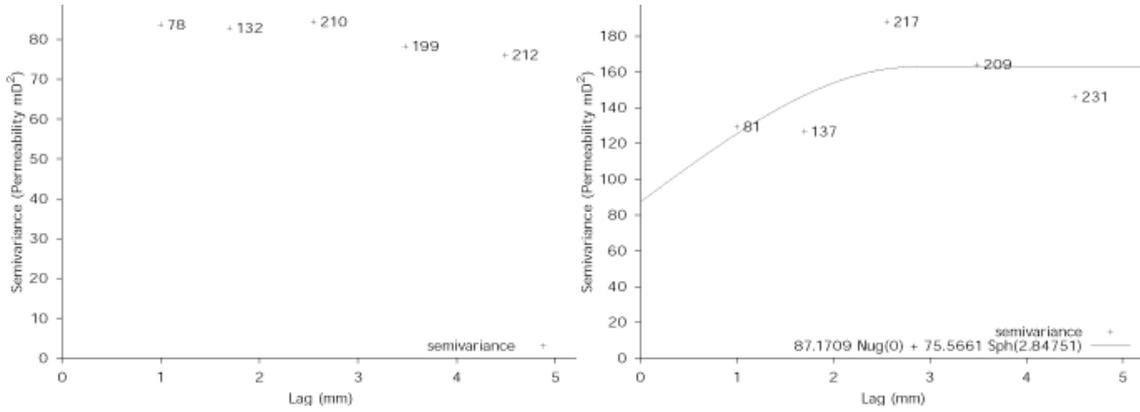
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 125,91 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 120,67 mD.



Sigla: 28-Crt

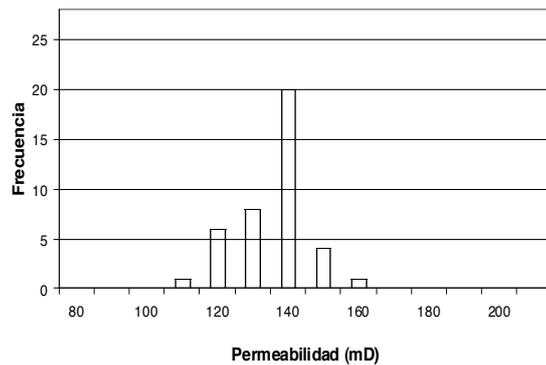
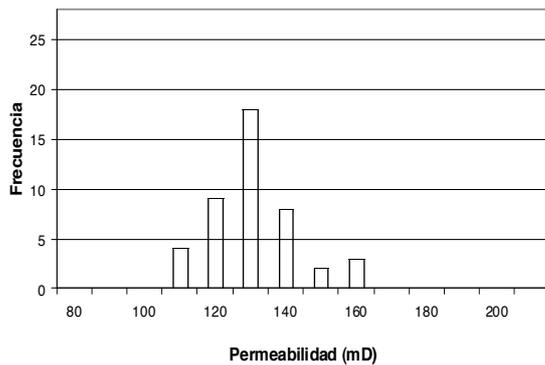
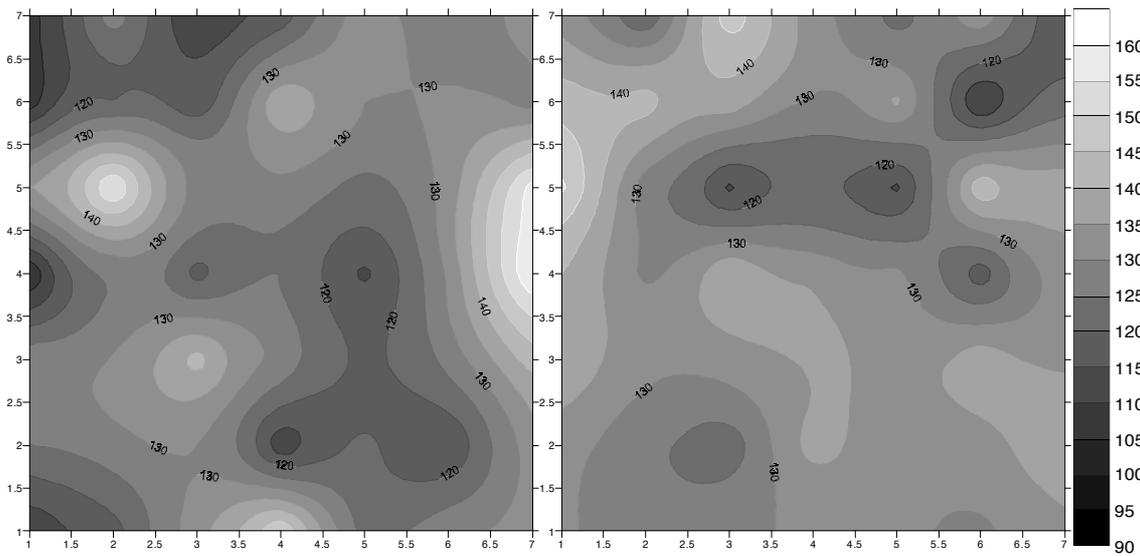
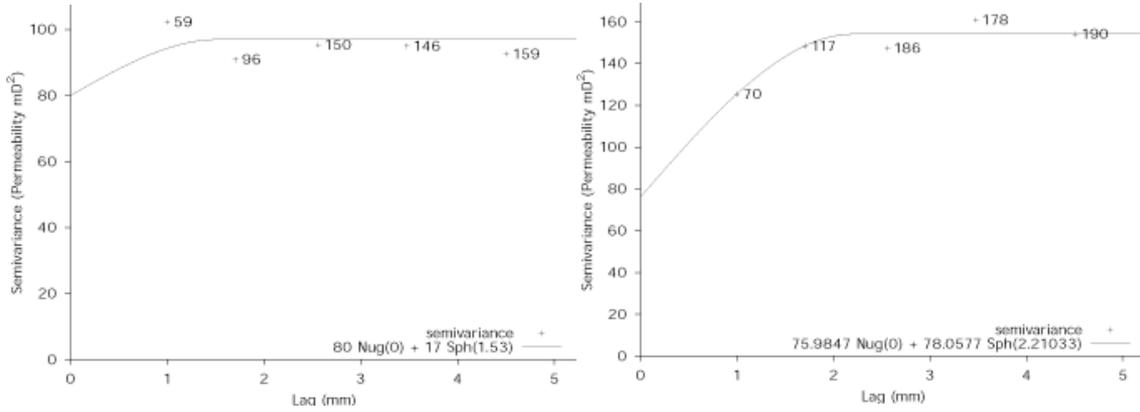
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 126,98 mD.

Permeabilidad: 131,22 mD.



Sigla: 29-A

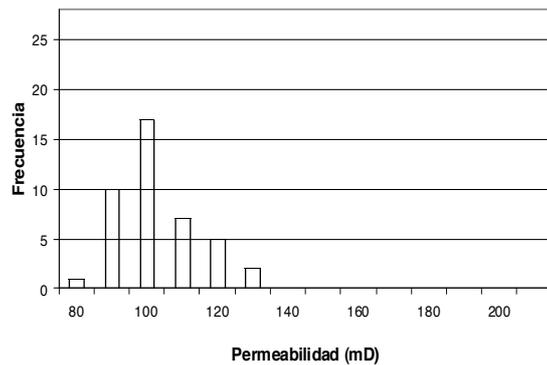
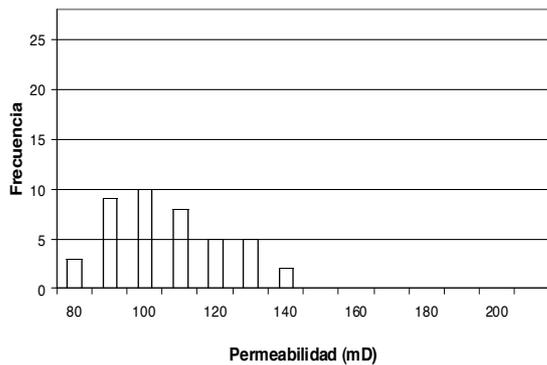
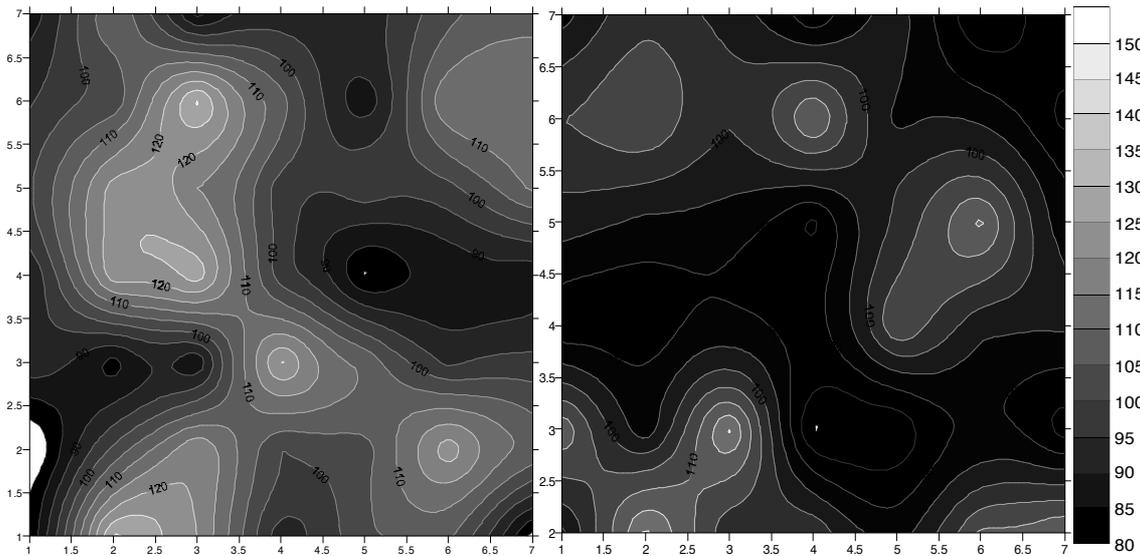
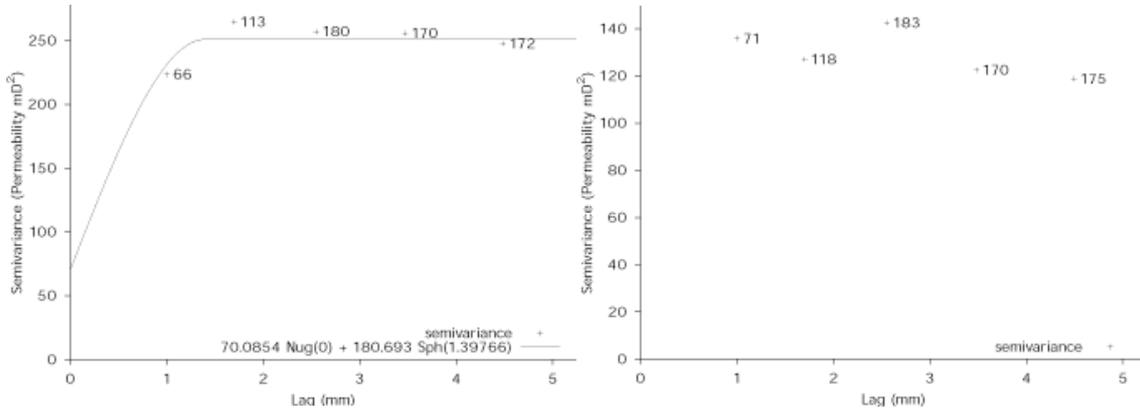
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 101,73 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 97,12 mD.



Sigla: 29-A

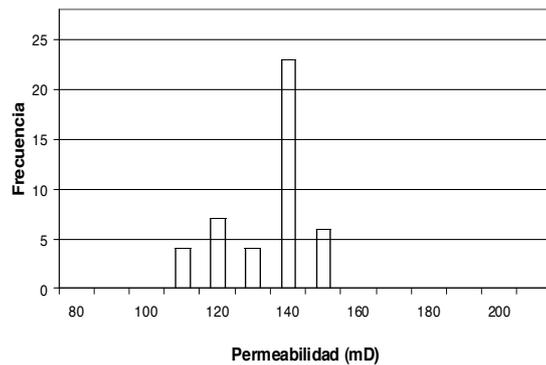
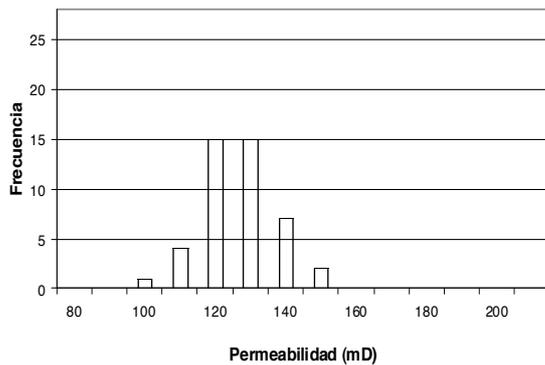
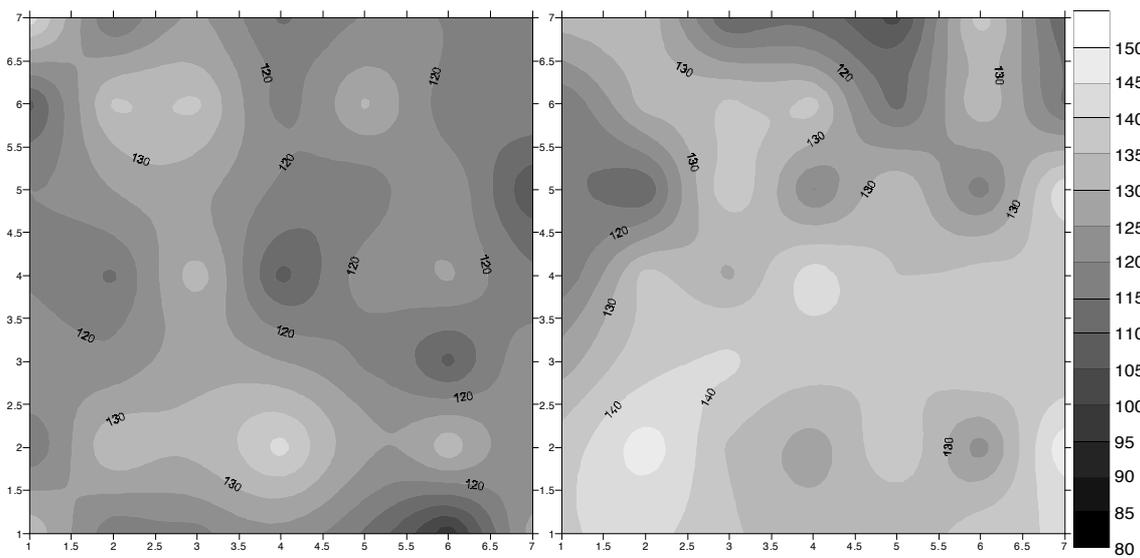
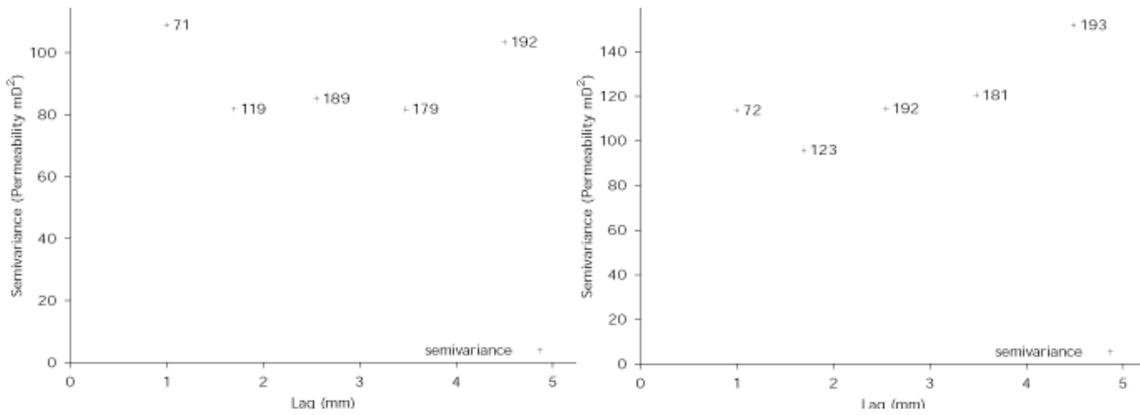
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 122 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 130,43 mD.



Sigla: 29-A

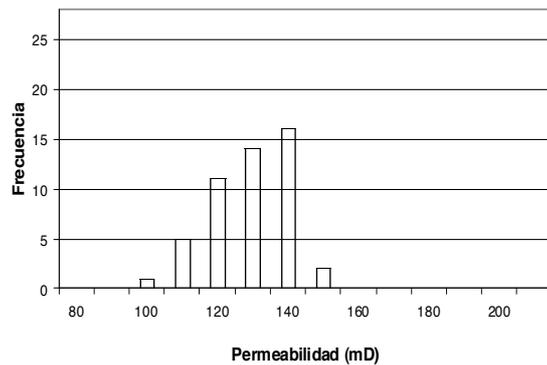
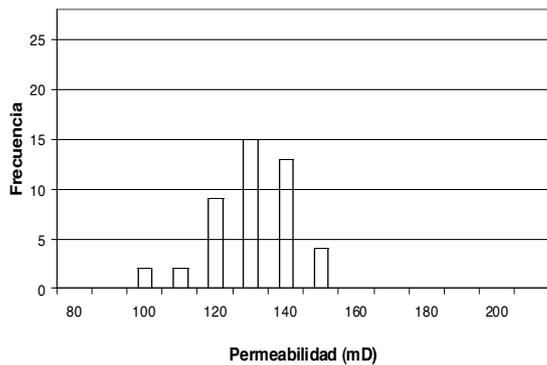
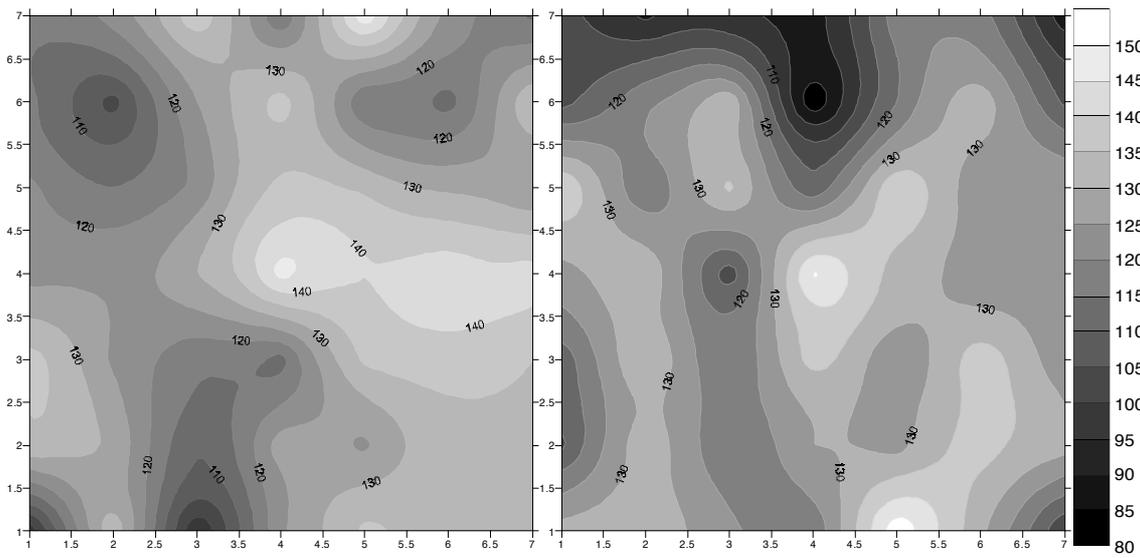
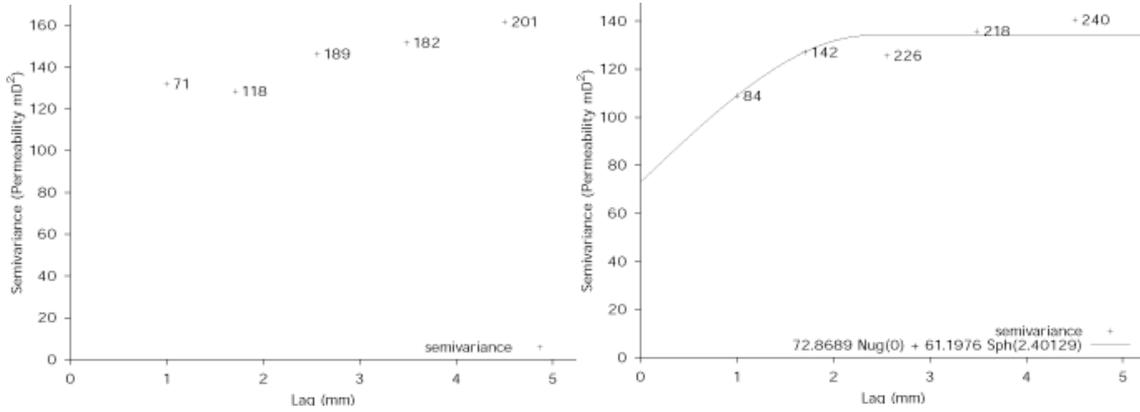
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 125,67 mD.

Permeabilidad: 124,77 mD.



Sigla: 30-D

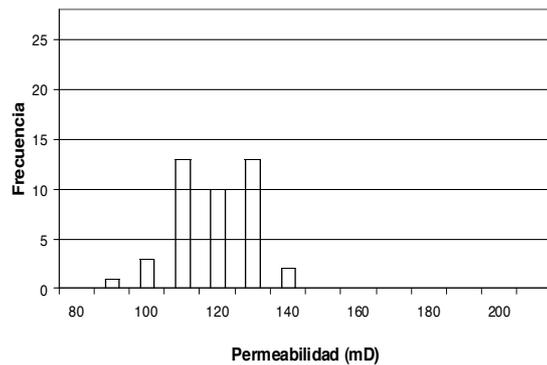
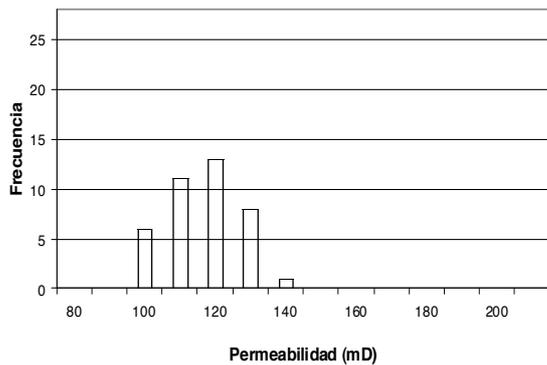
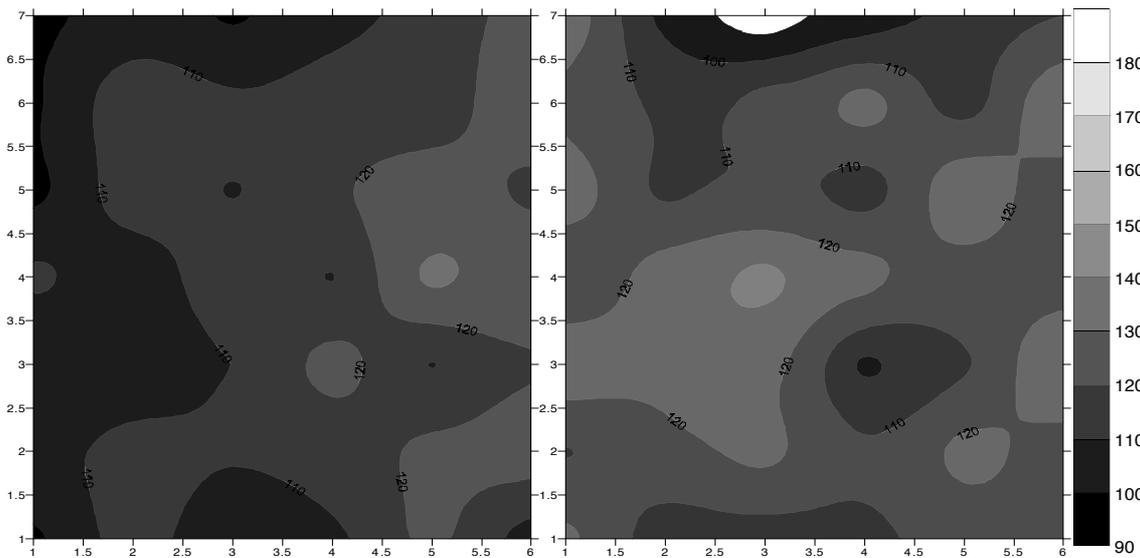
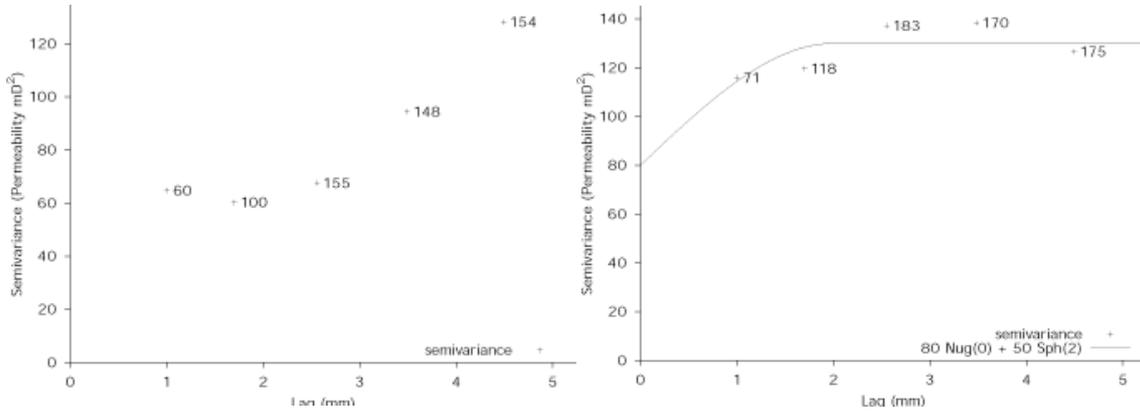
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 112,65 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 114,35 mD.



Sigla: 30-D

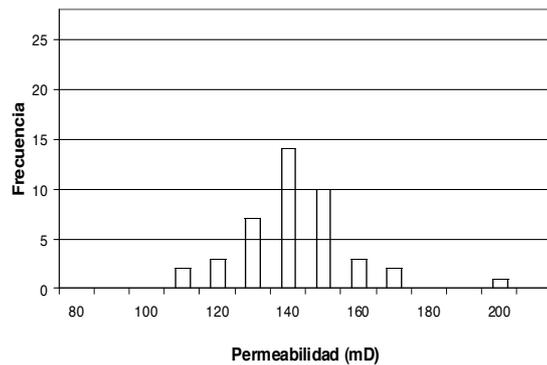
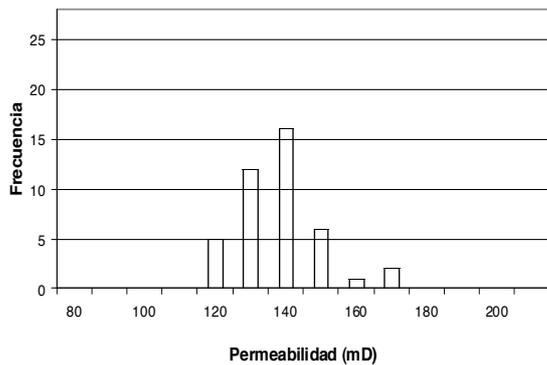
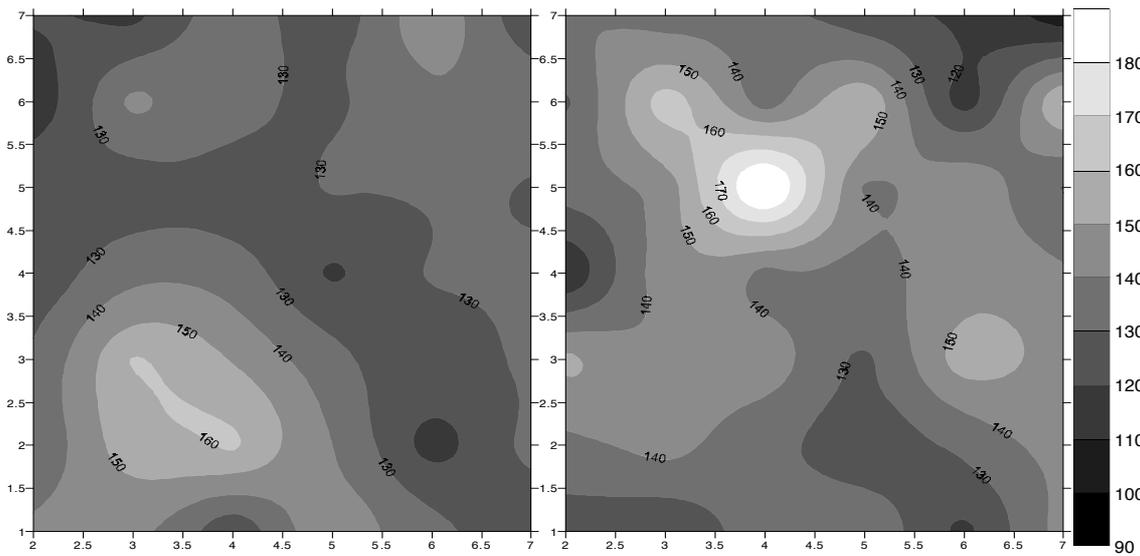
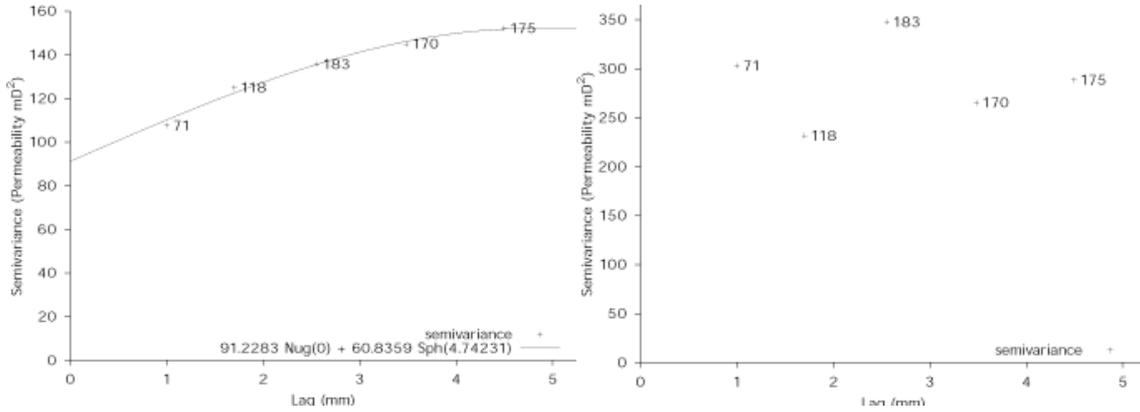
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 132,78 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 137,74 mD.



Sigla: 30-D

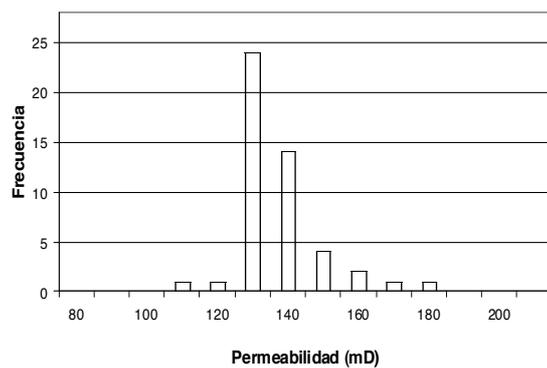
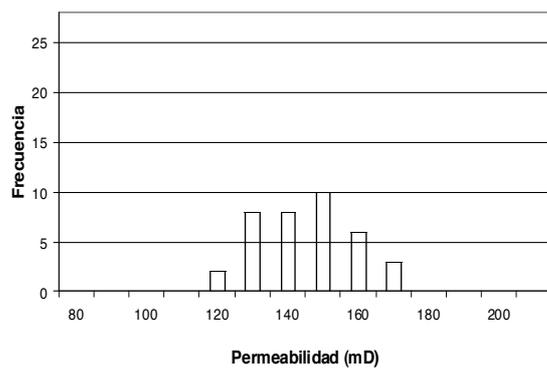
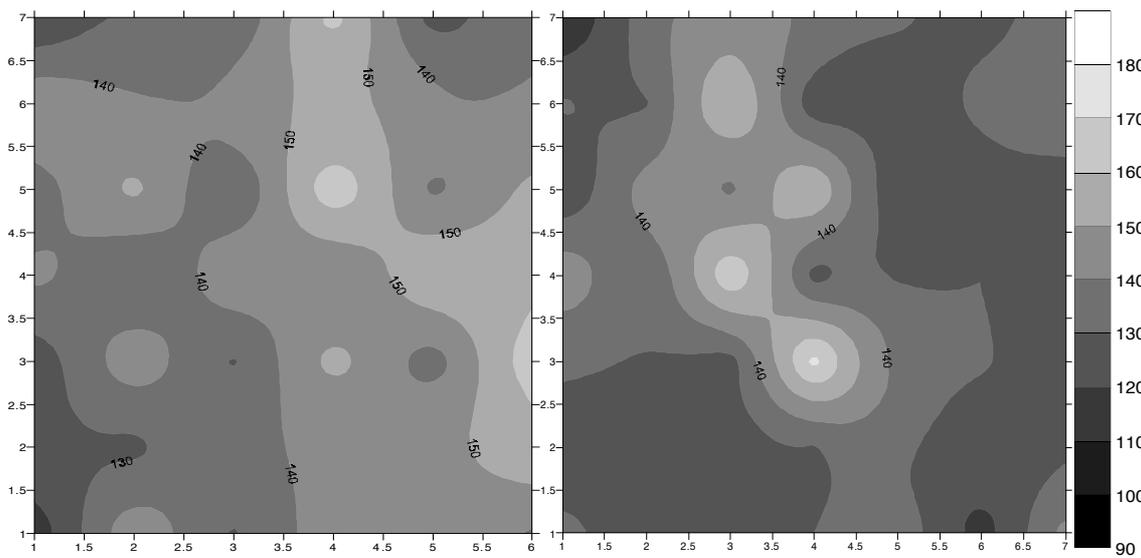
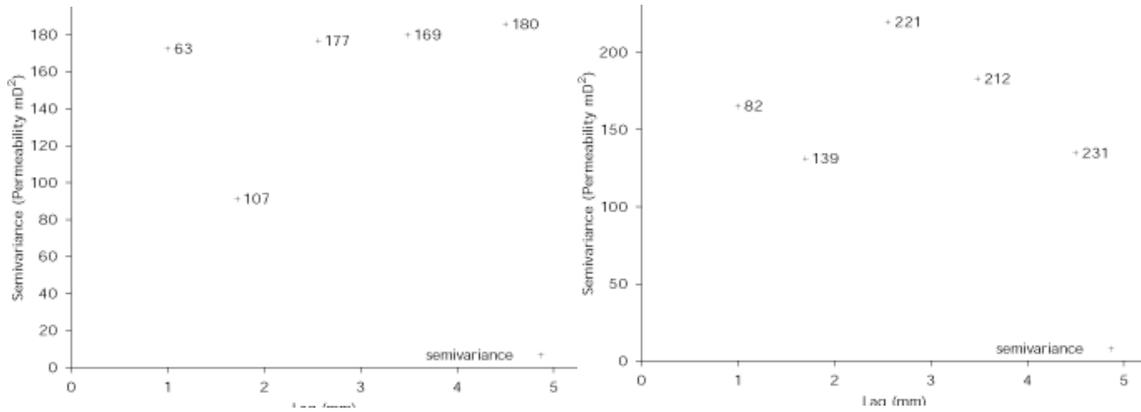
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 140,78 mD.

Permeabilidad: 132,73 mD.



Sigla: 31-B11

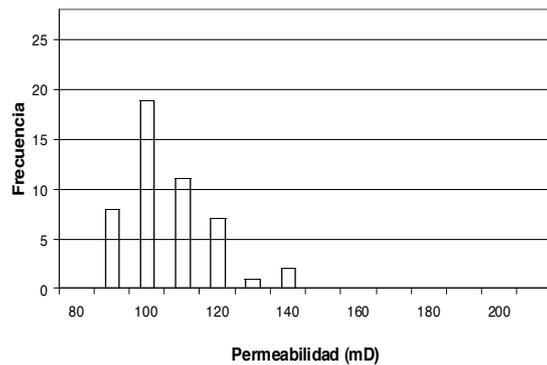
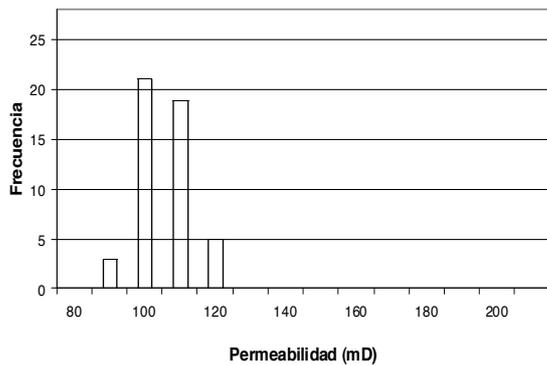
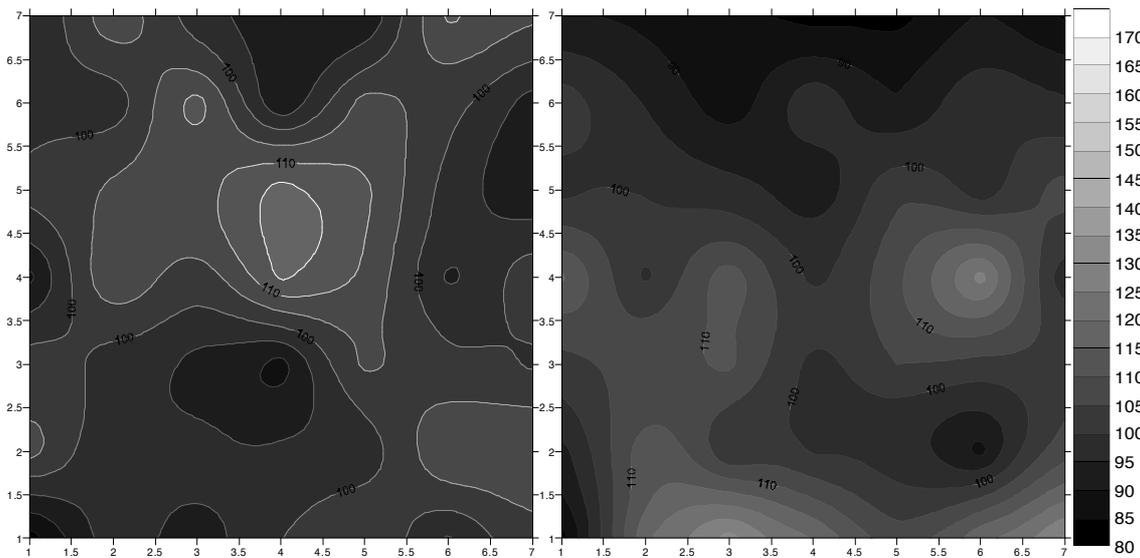
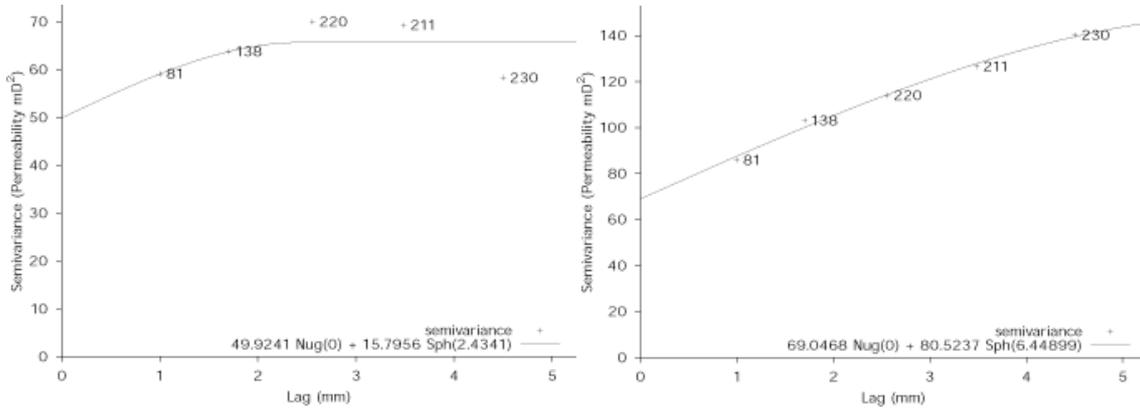
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 100,68 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 101,68 mD.



Sigla: 31-B11

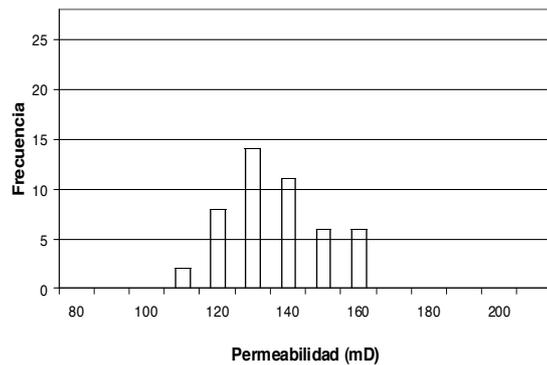
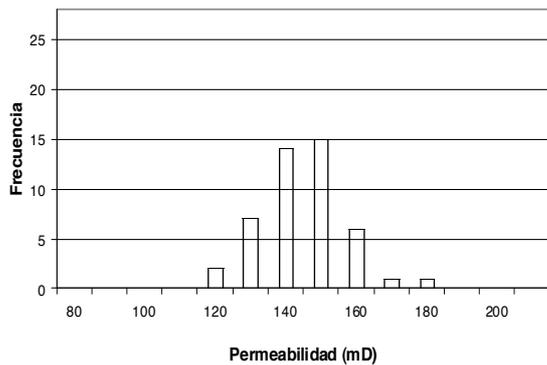
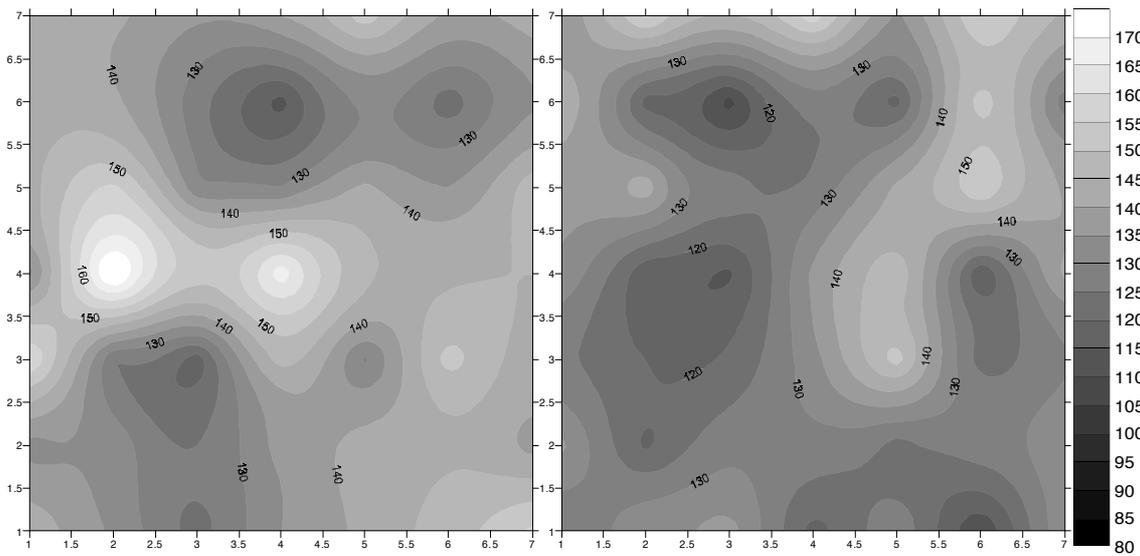
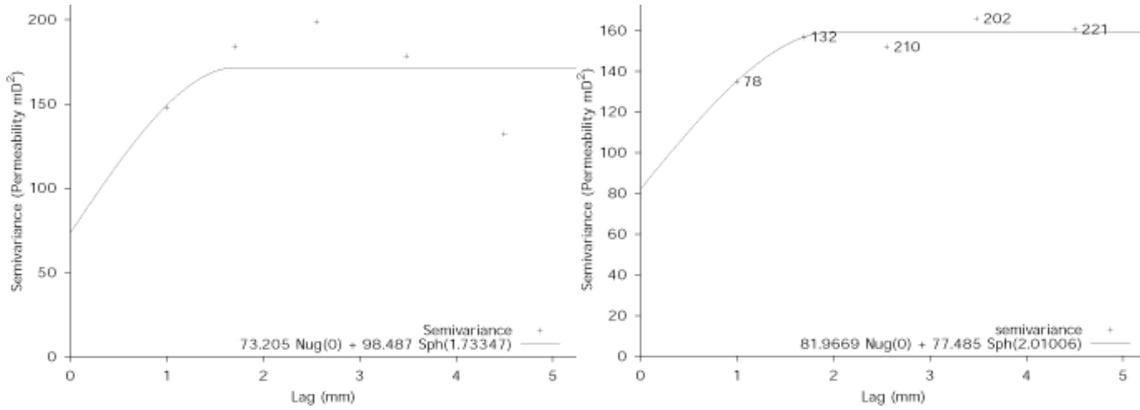
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 139,67 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 131,91 mD.



Sigla: 31-B11

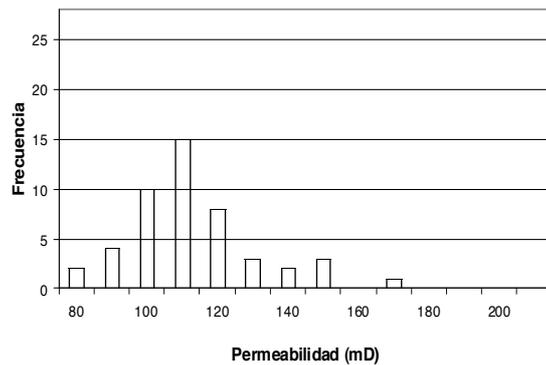
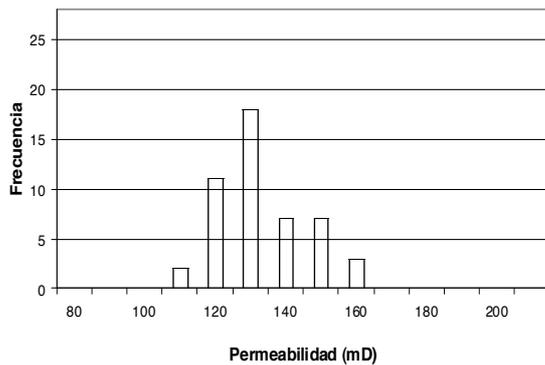
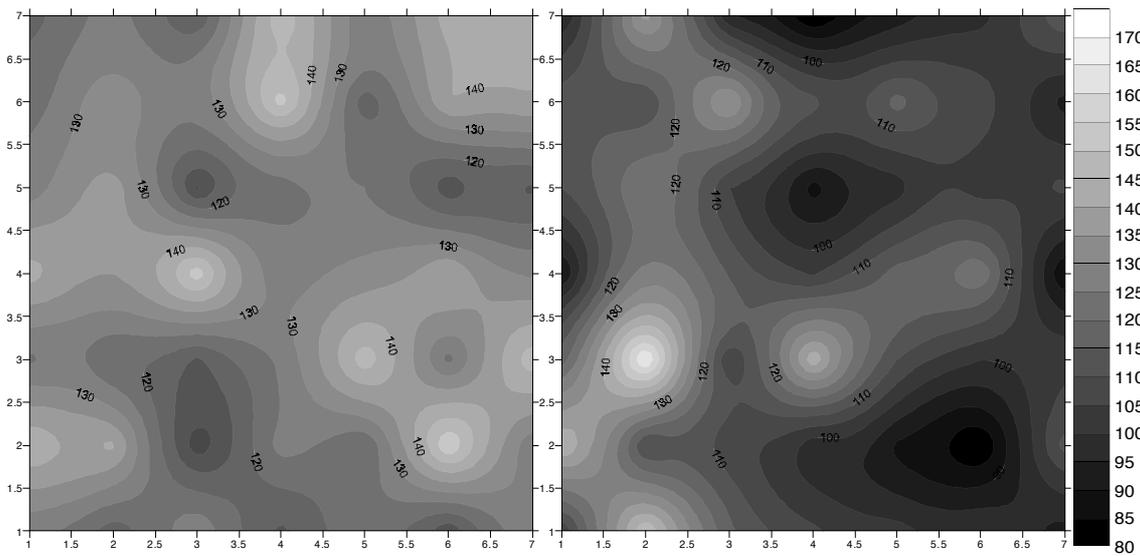
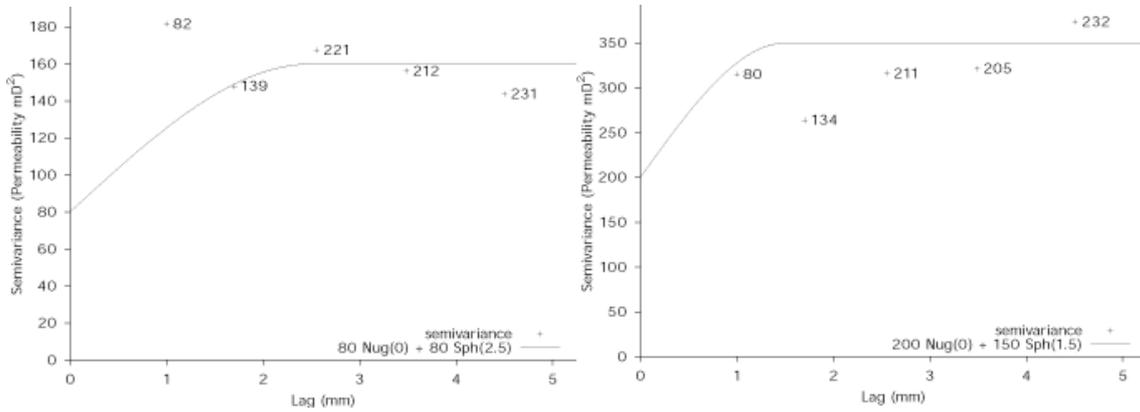
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 128,89 mD.

Permeabilidad: 109,08 mD.



Sigla: 31-B12

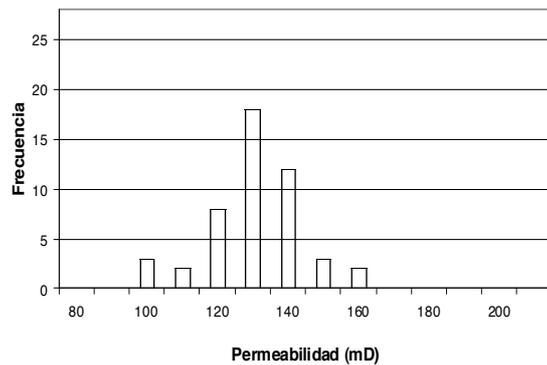
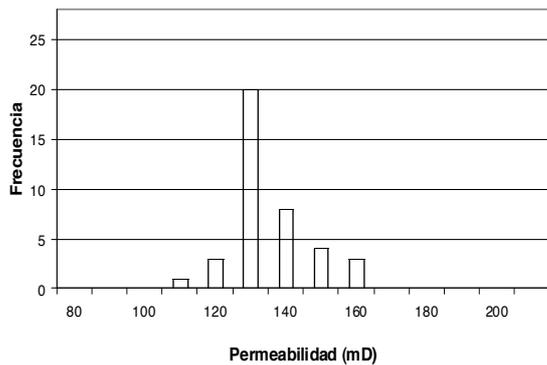
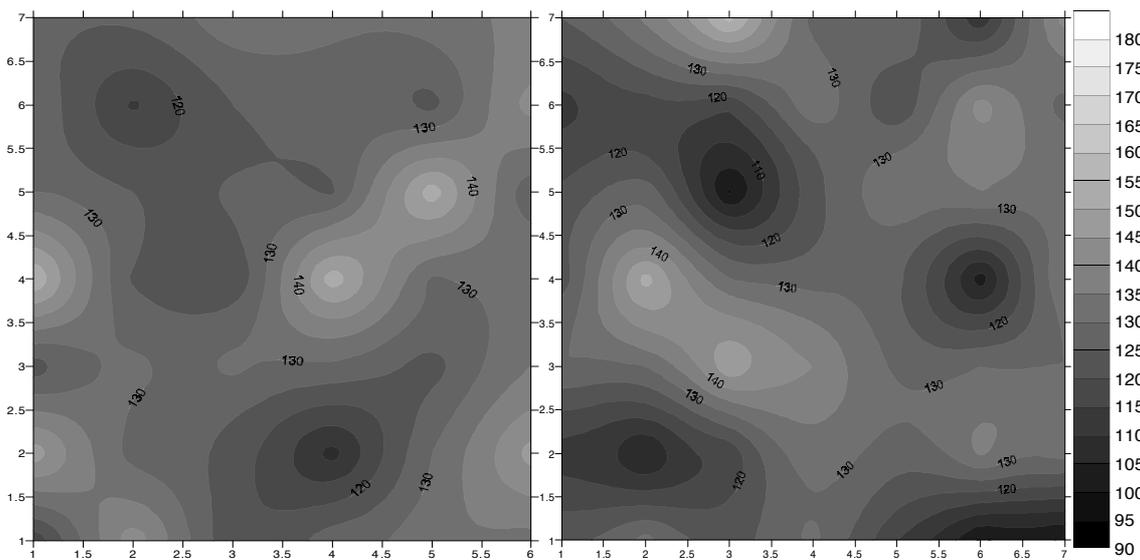
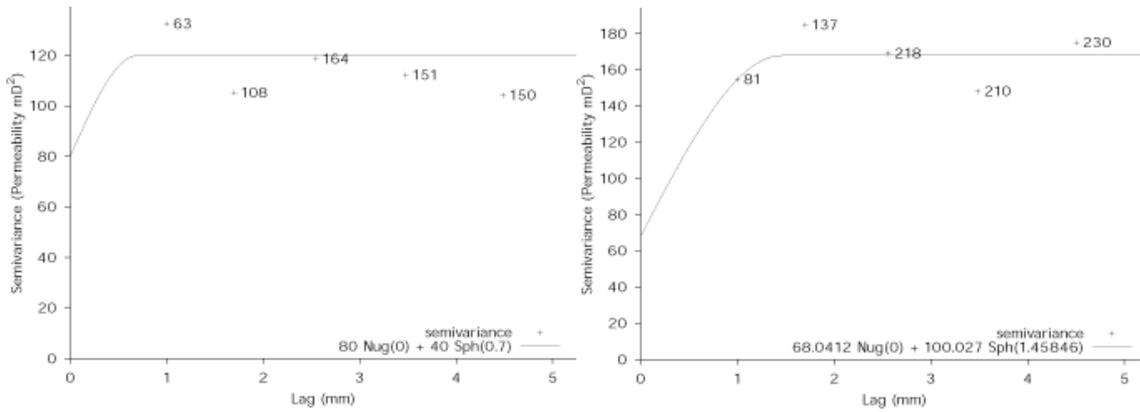
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 130,31 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 126,46 mD.



Sigla: 31-B12

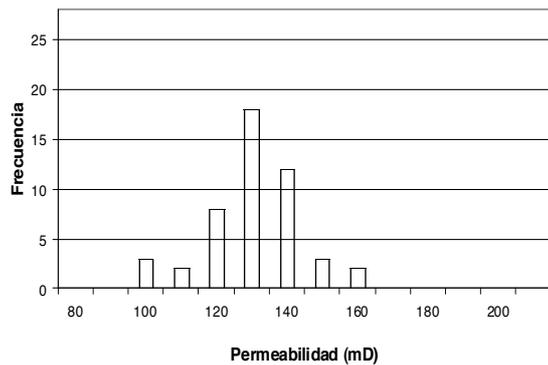
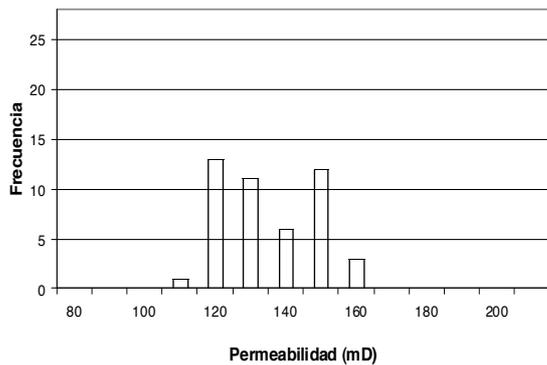
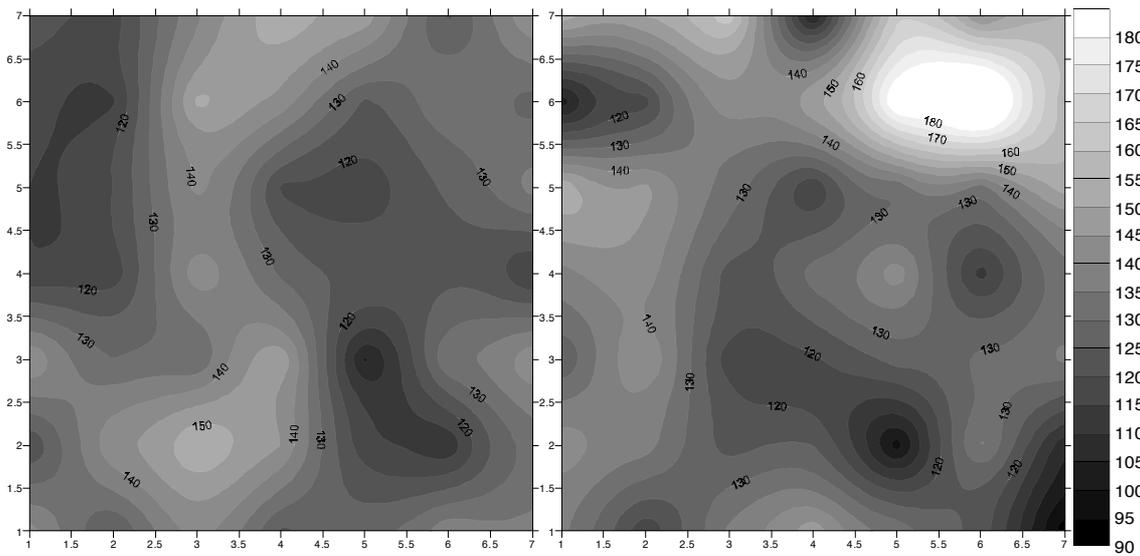
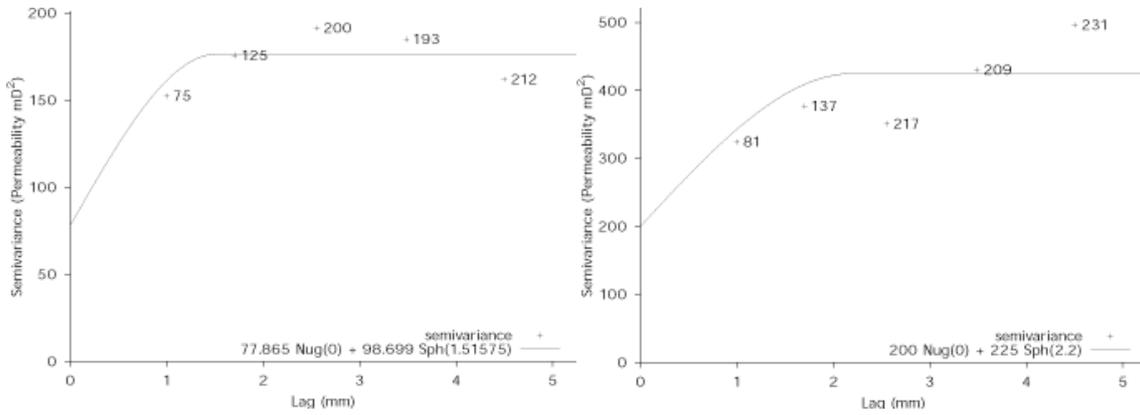
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 130,78 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 135,29 mD.



Sigla: 31-B12

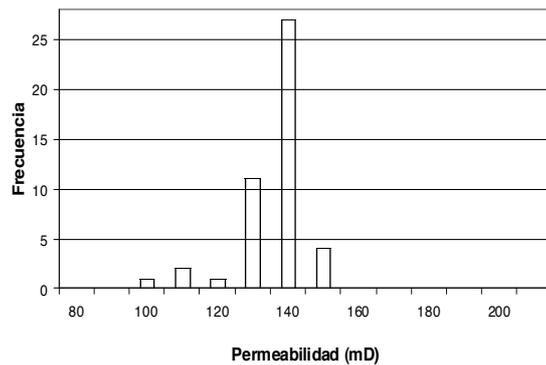
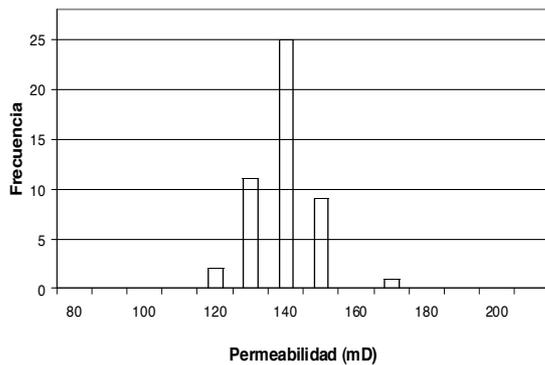
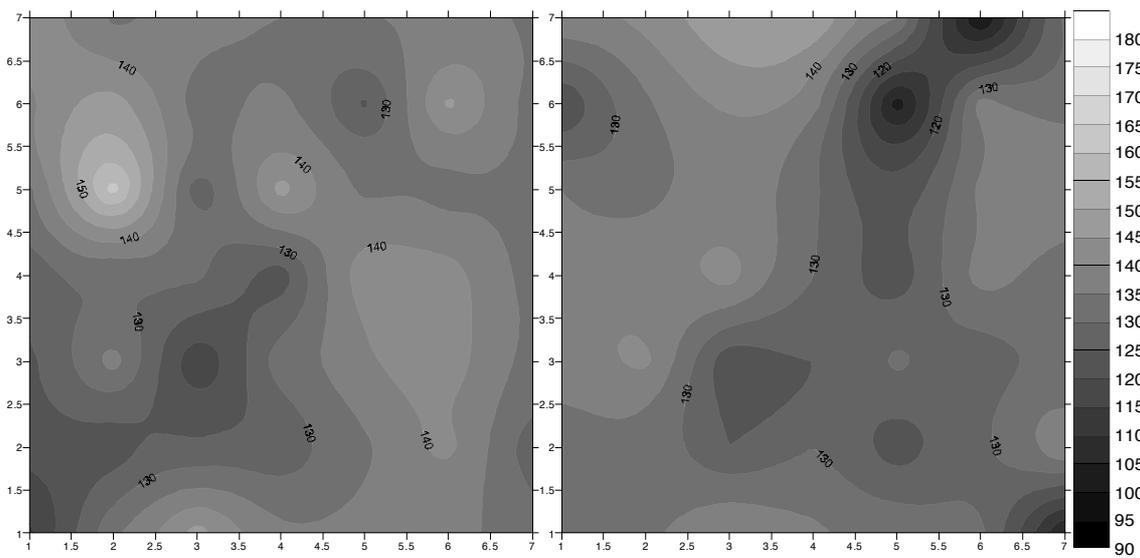
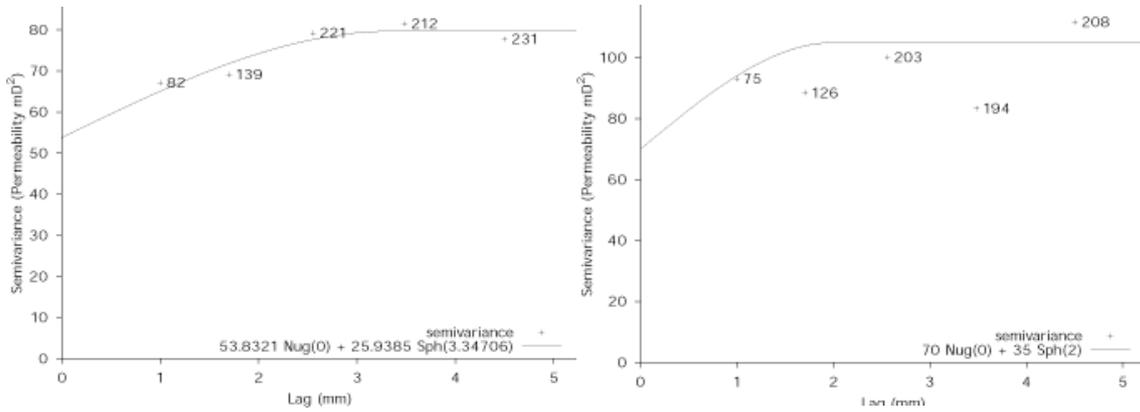
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 134,06 mD.

Permeabilidad: 131,19 mD.



Sigla: 31-B13

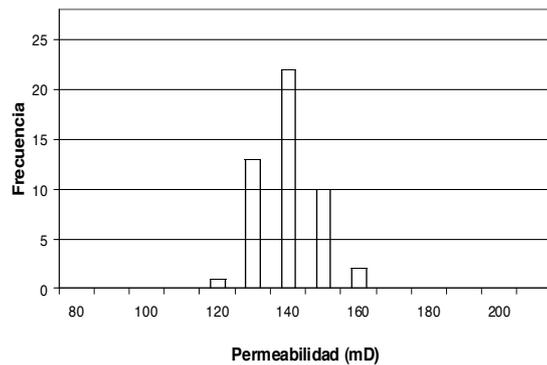
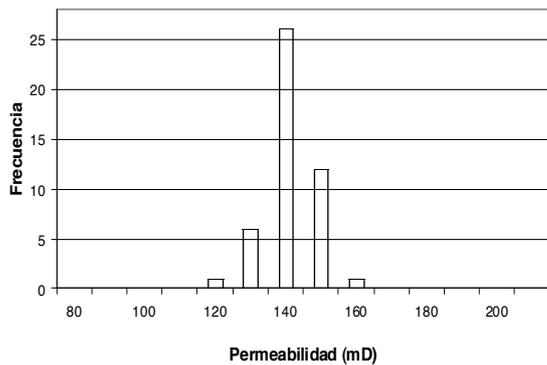
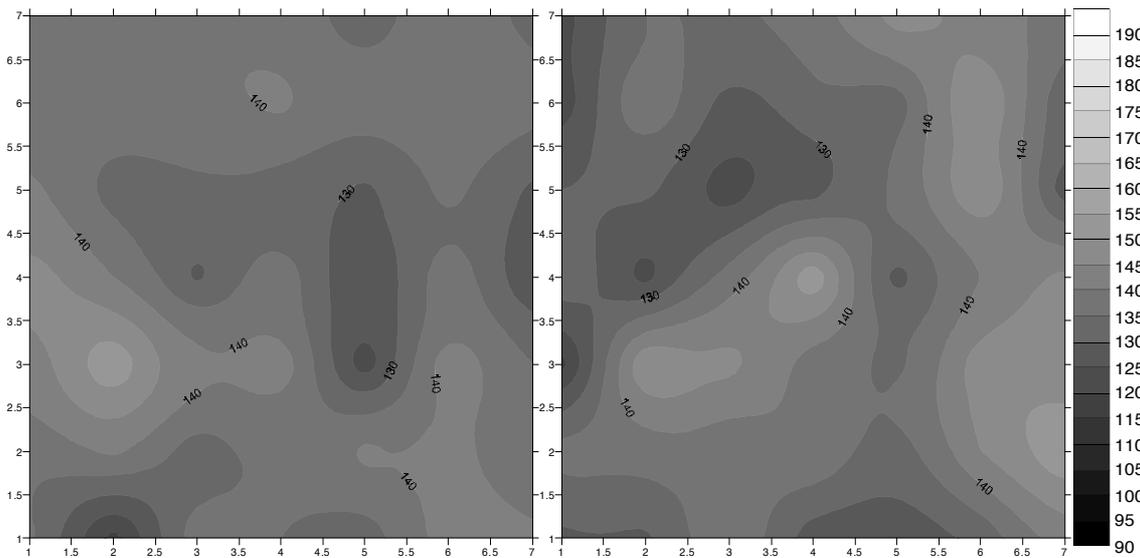
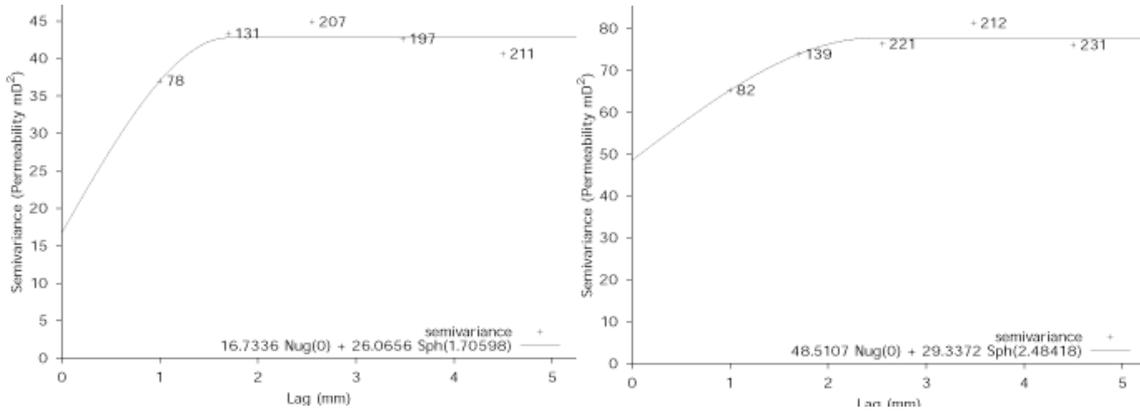
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 136,32 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 135,87 mD.



Sigla: 31-B13

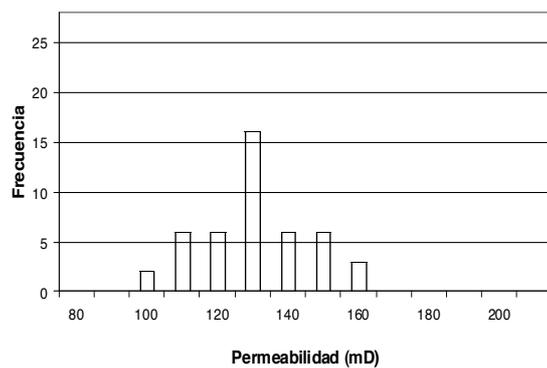
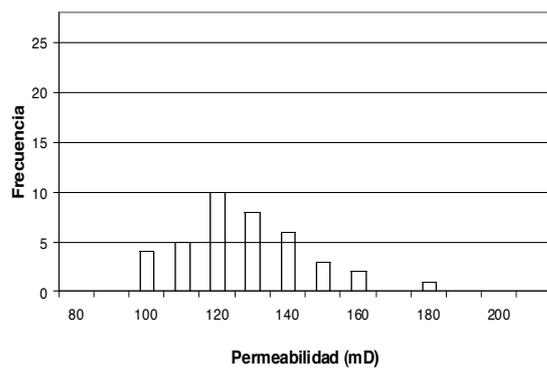
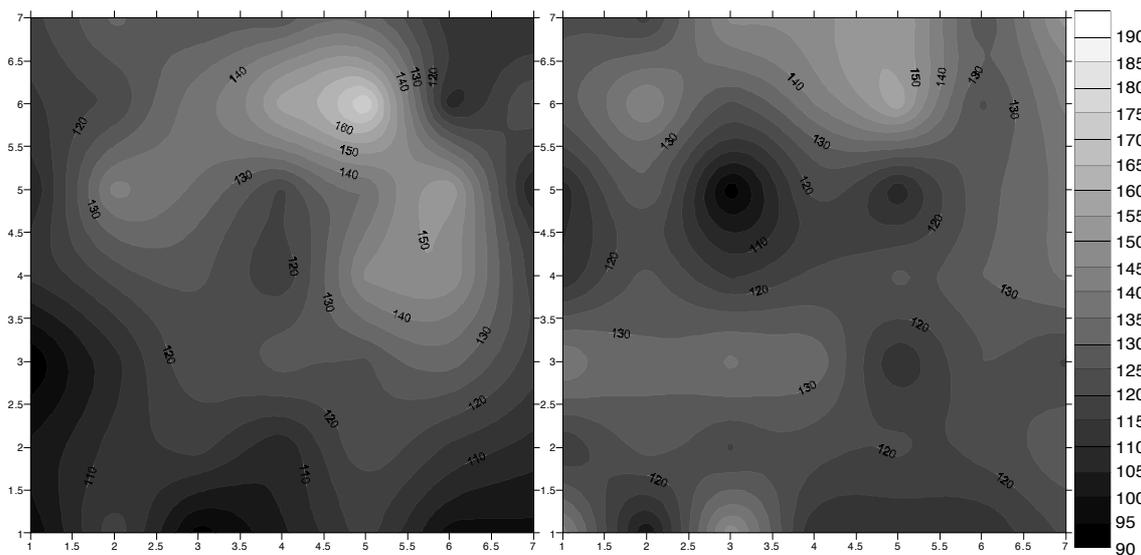
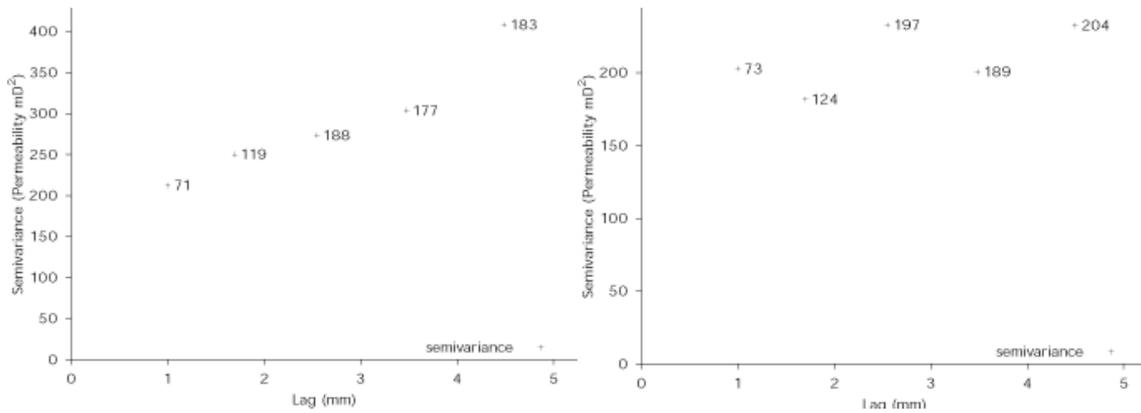
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 121,84 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 126,78 mD.



Sigla: 31-B13

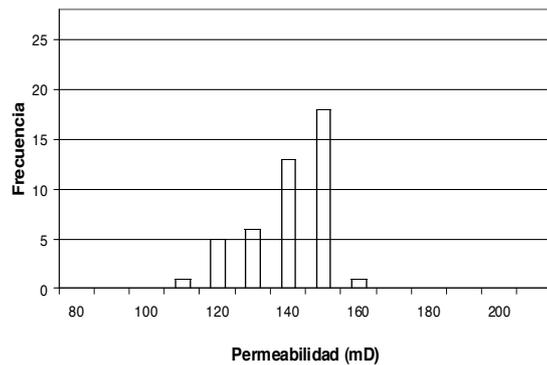
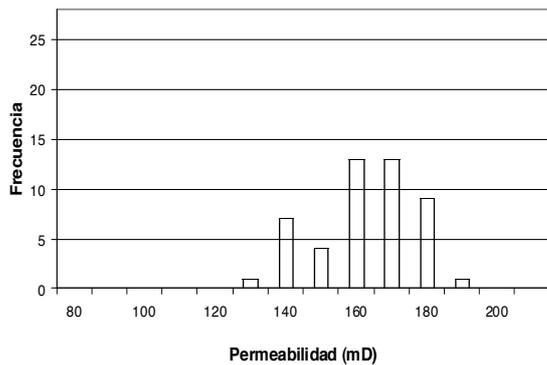
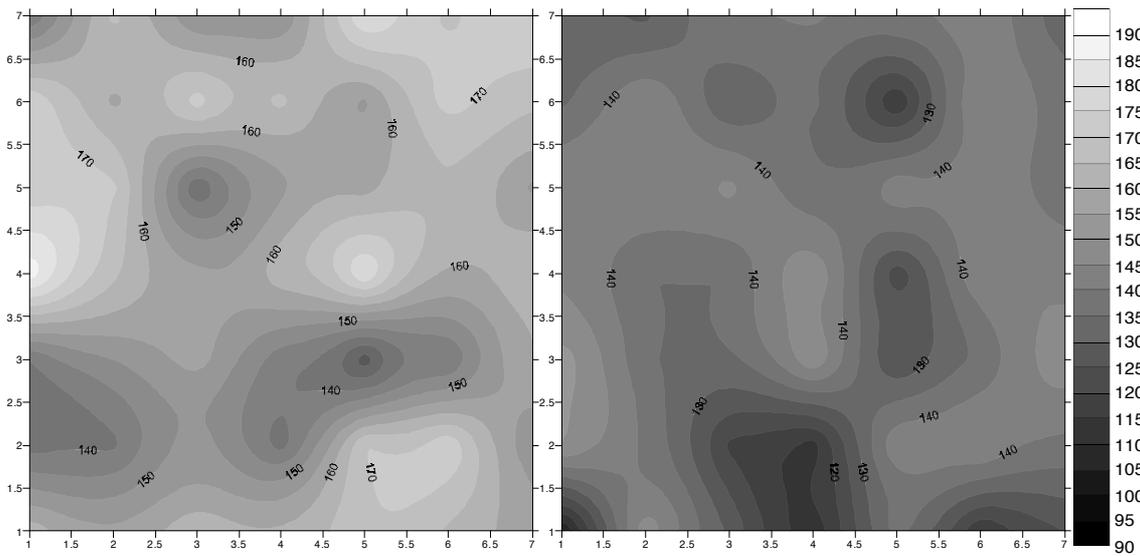
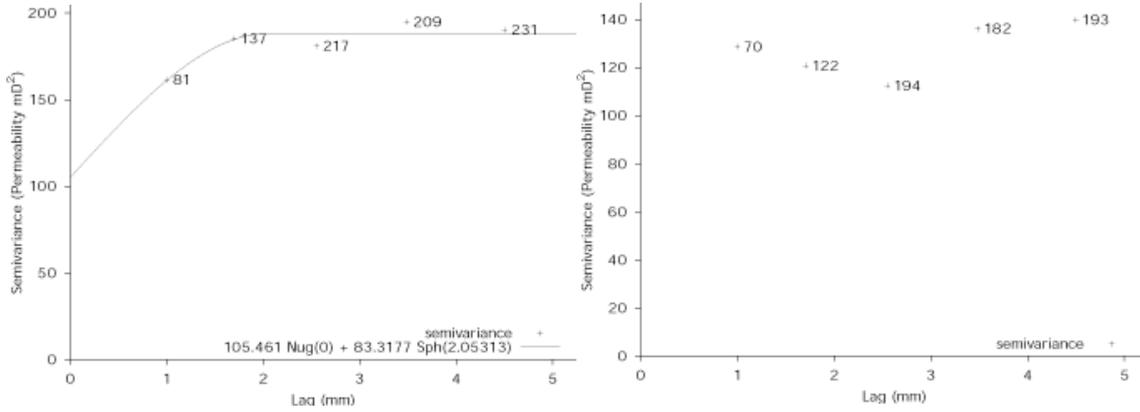
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara ⊥

Permeabilidad: 158,91 mD.

Permeabilidad: 135,84 mD.



Sigla: 8-Tu

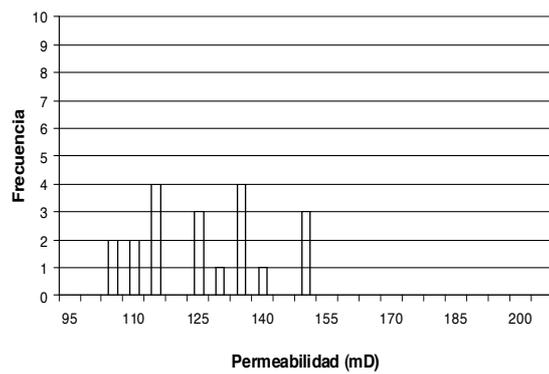
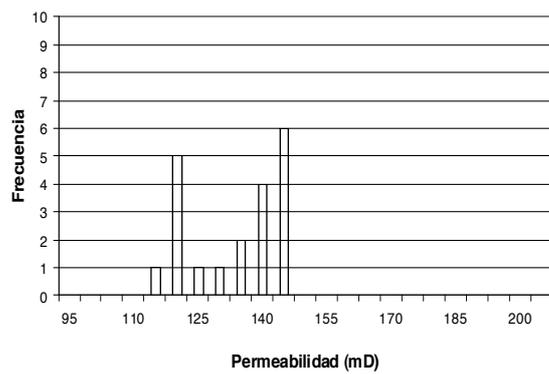
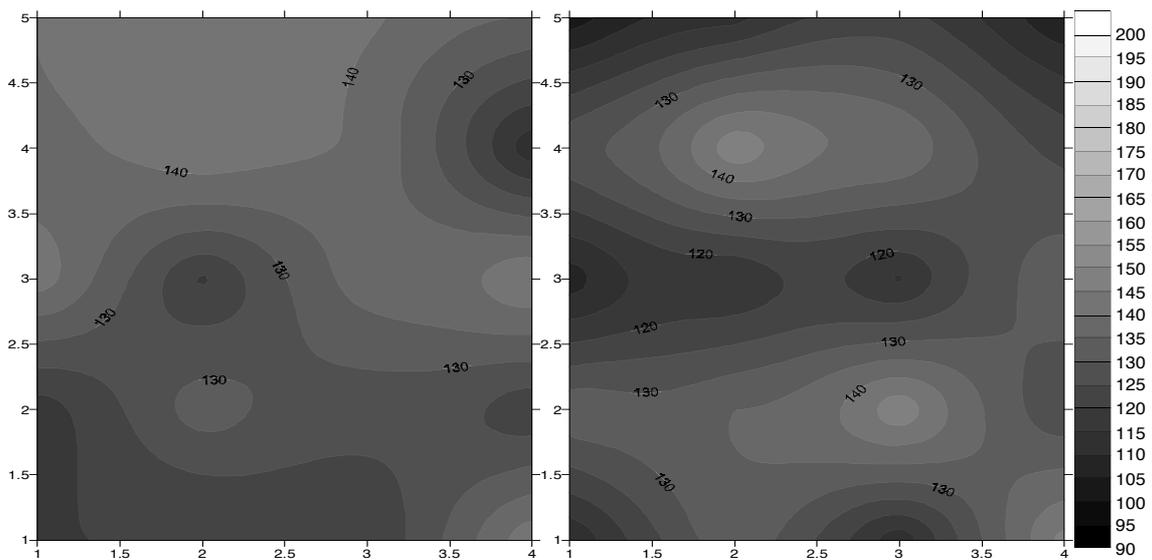
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 131,95 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 124,9 mD.



Sigla: 8-Tu

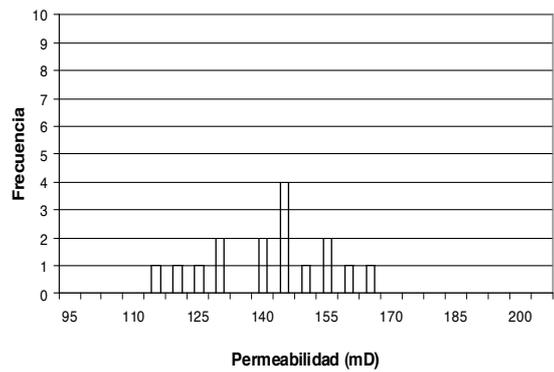
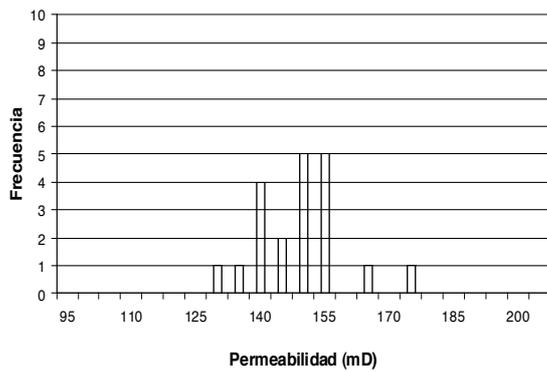
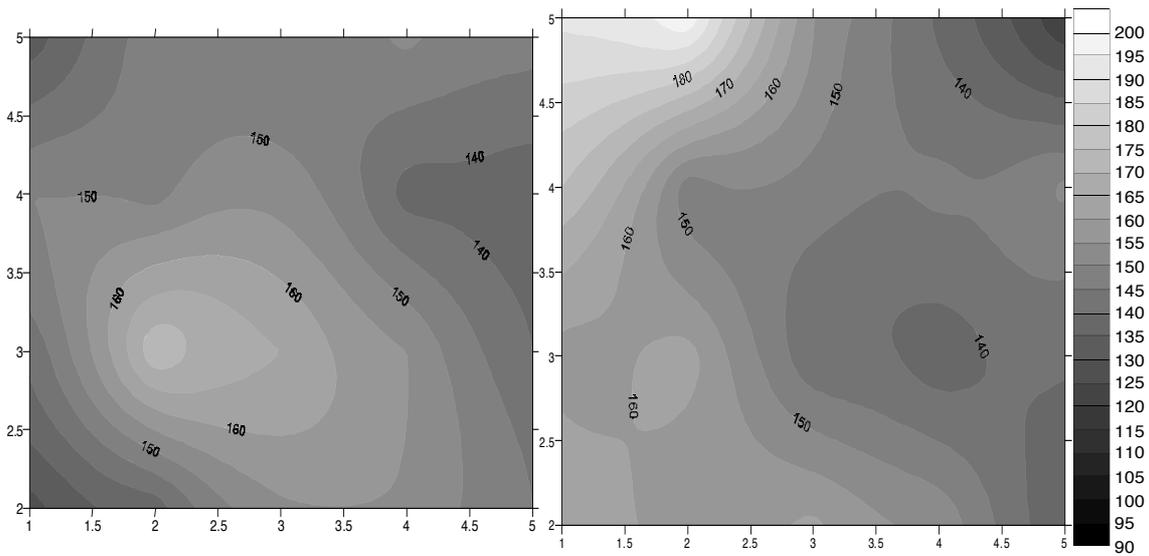
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 147,15 mD.

Cara \perp

Permeabilidad: 141,50 mD.



Sigla: 8-Tu

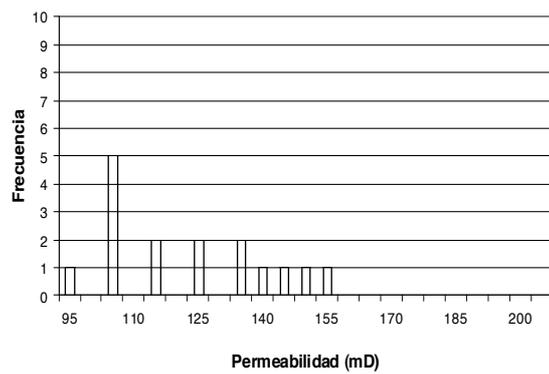
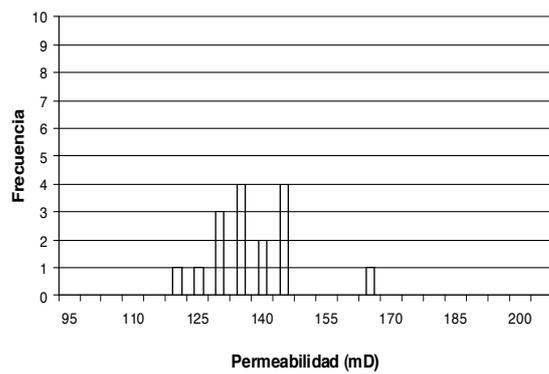
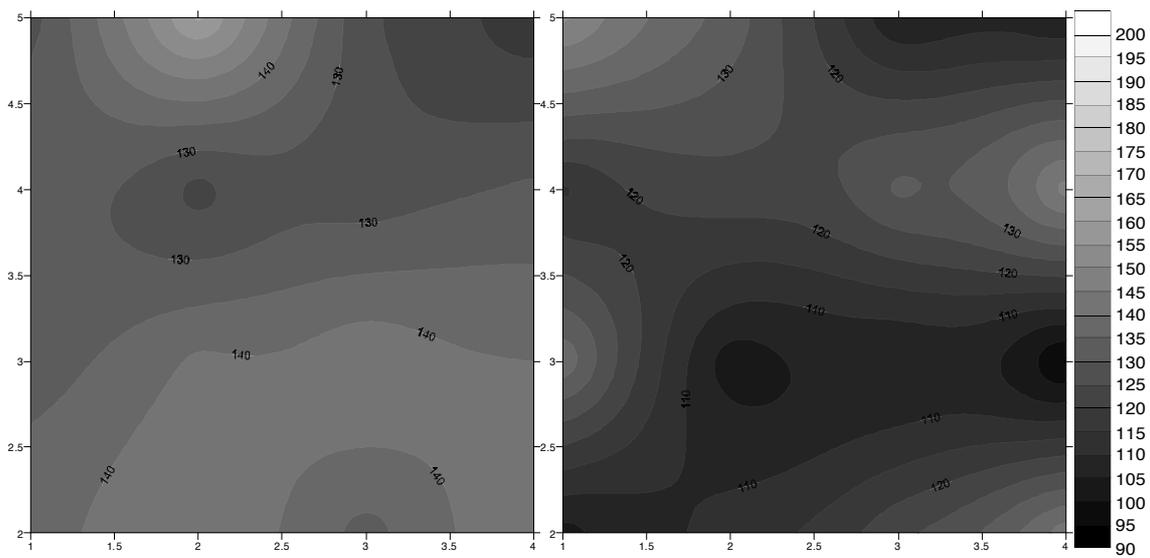
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Cara \perp

Permeabilidad: 135,18 mD.

Permeabilidad: 120,668 mD.



Sigla: 9-Fr

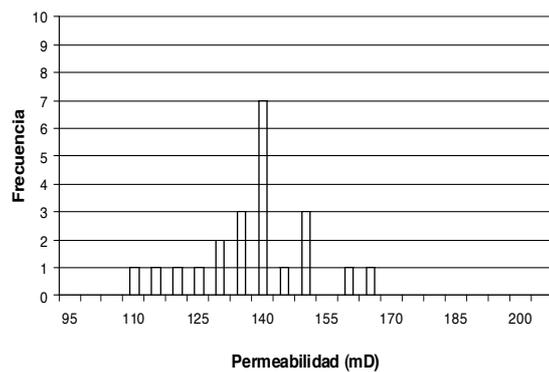
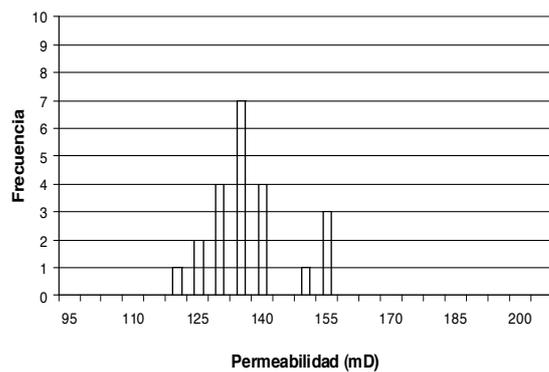
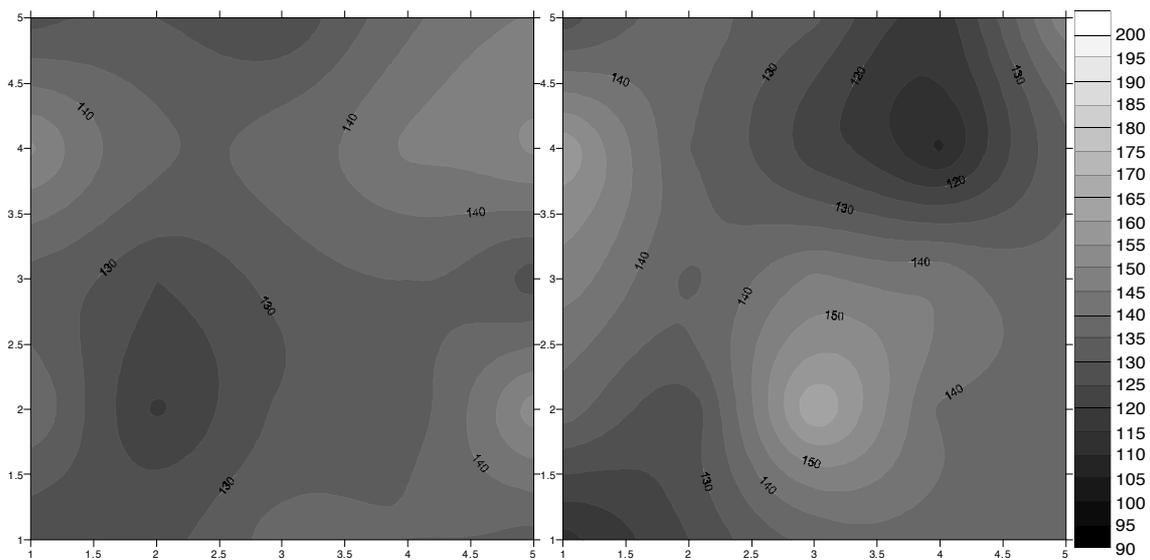
Antes del ensayo de cristalización de sales.

Cara //

Permeabilidad: 134,73 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 135,95 mD.



Sigla: 9-Fr

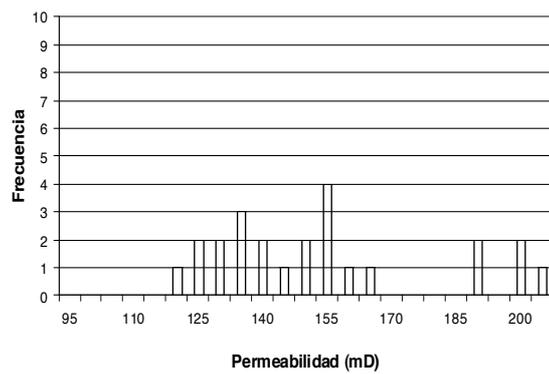
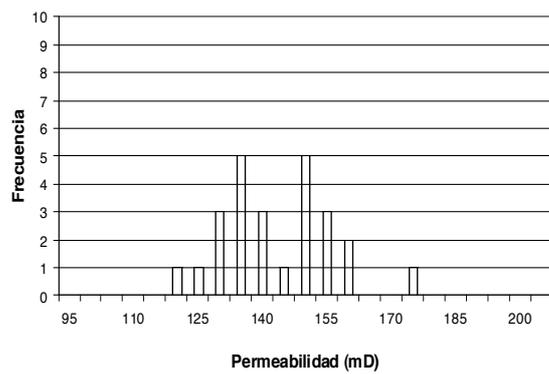
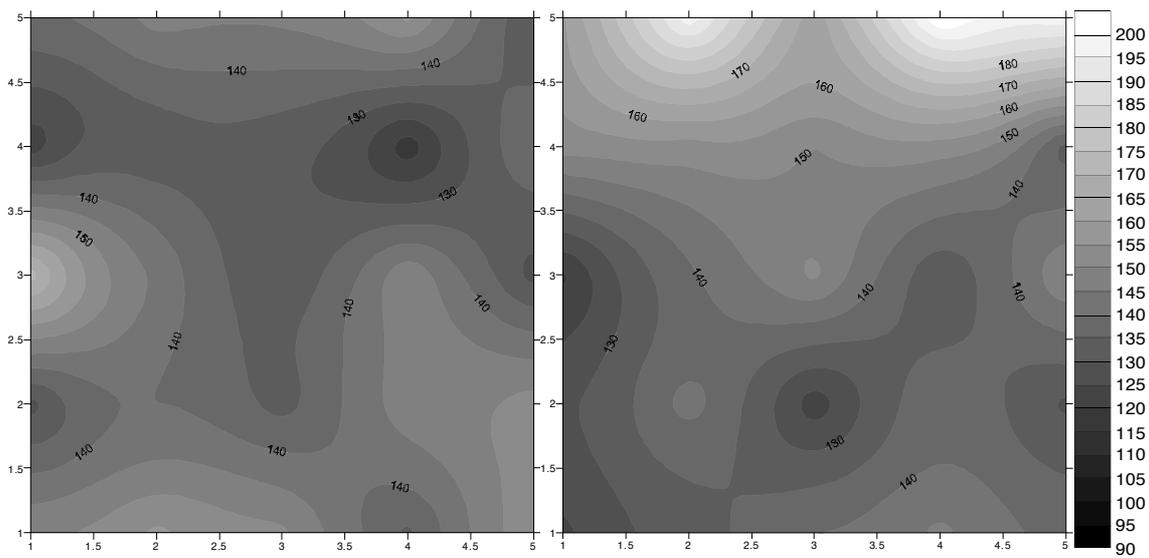
Tras el ensayo de cristalización de sales con $MgSO_4$.

Cara //

Permeabilidad: 141,2 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 148,21 mD.



Sigla: 9-Fr

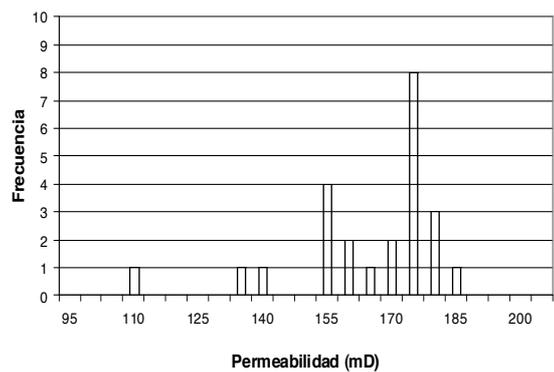
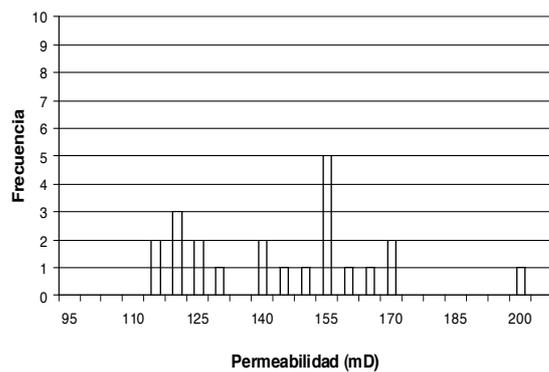
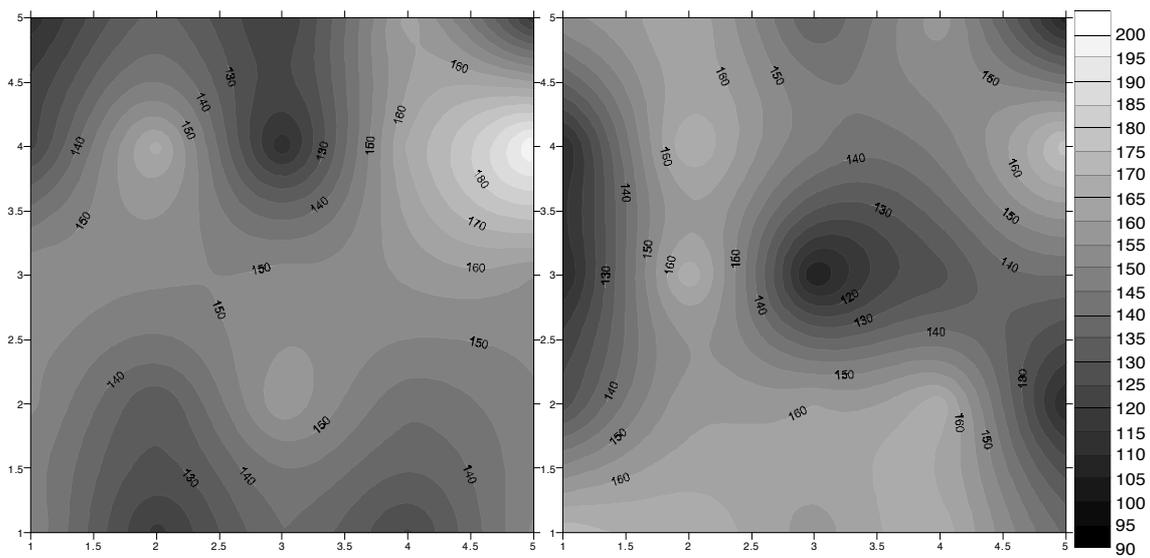
Tras el ensayo de cristalización de sales con NaCl.

Cara //

Permeabilidad: 142,63 mD.

Cara ⊥

Permeabilidad: 163,04 mD.



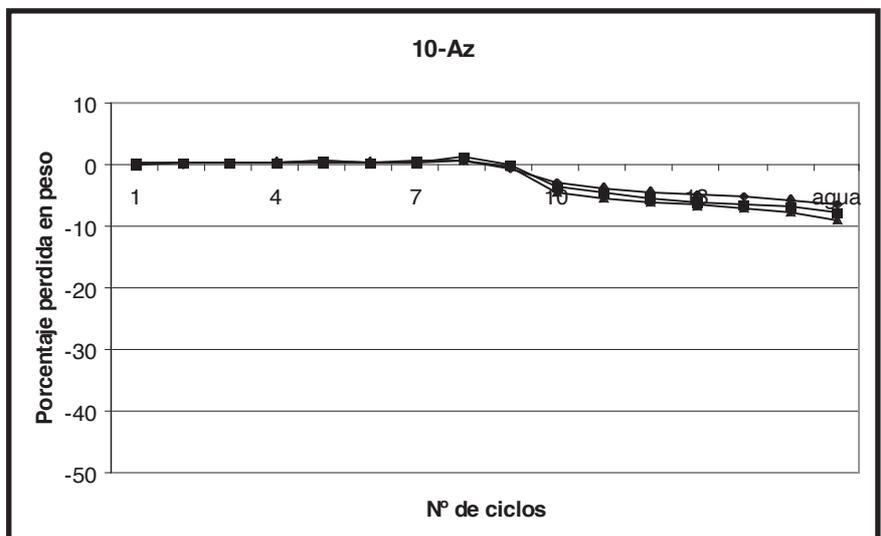
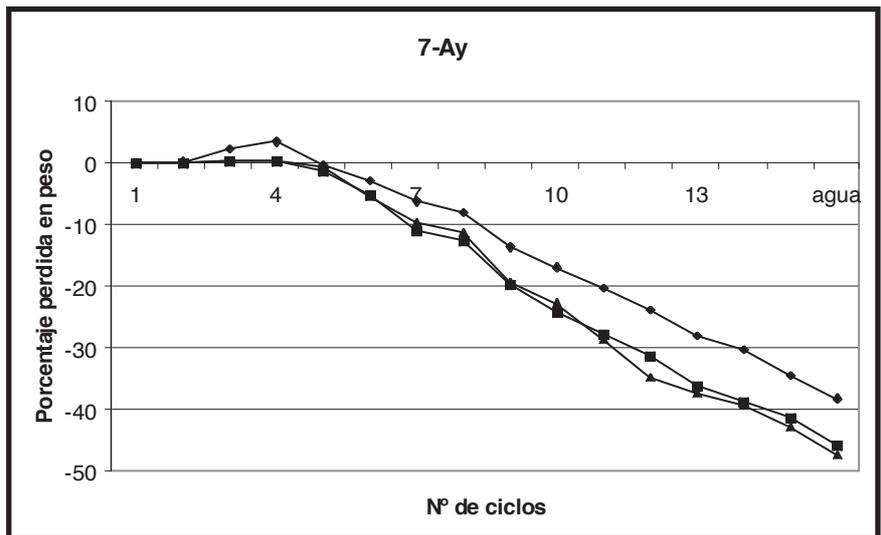
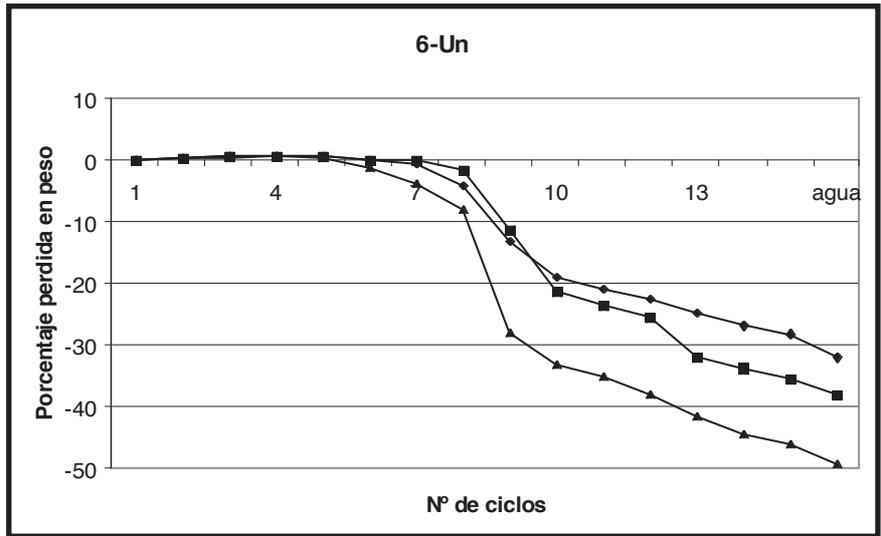
ANEXO 4

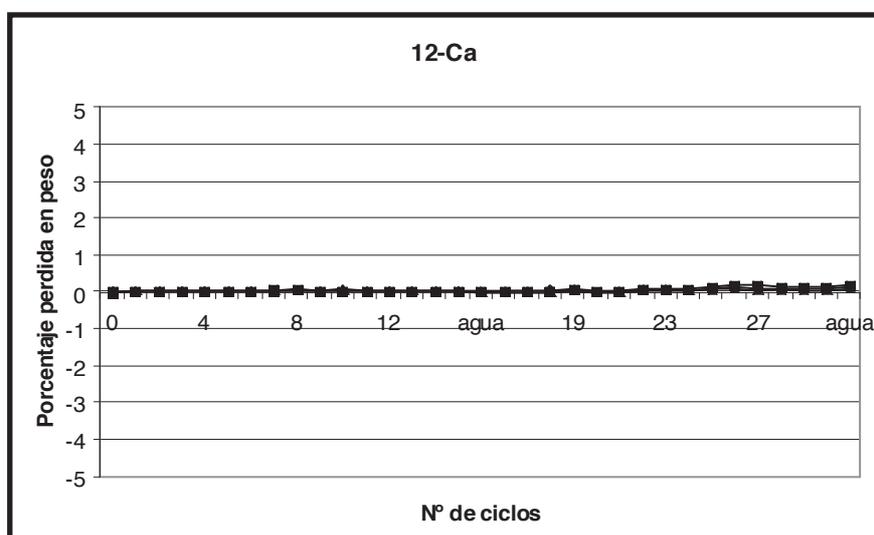
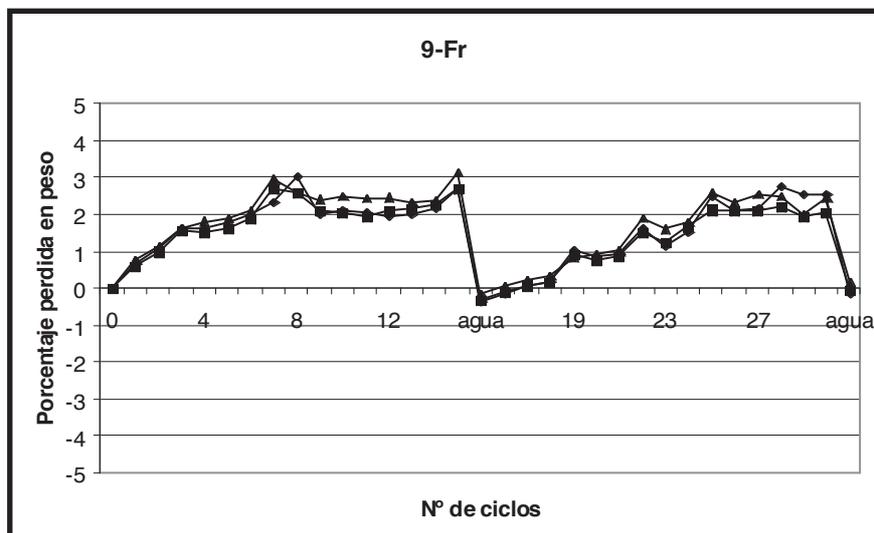
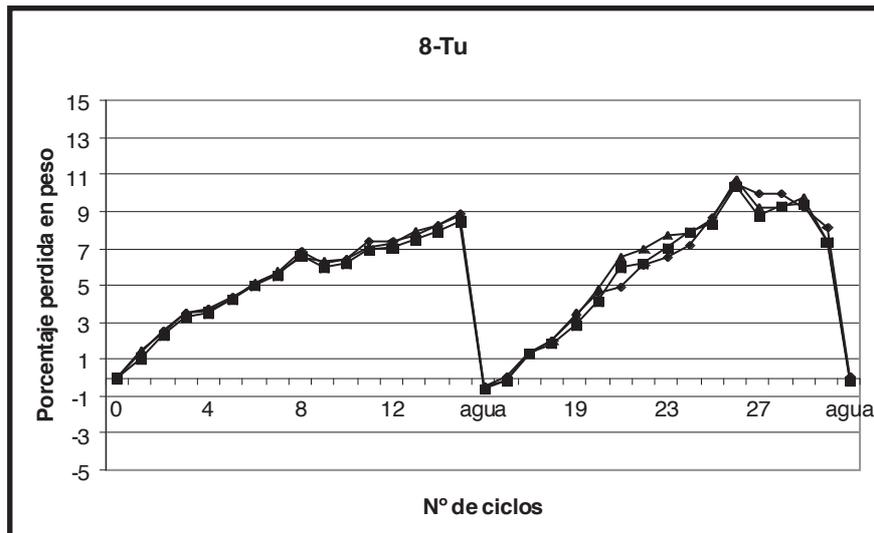
Gráficas de pérdida en peso durante el ensayo de cristalización de sales.

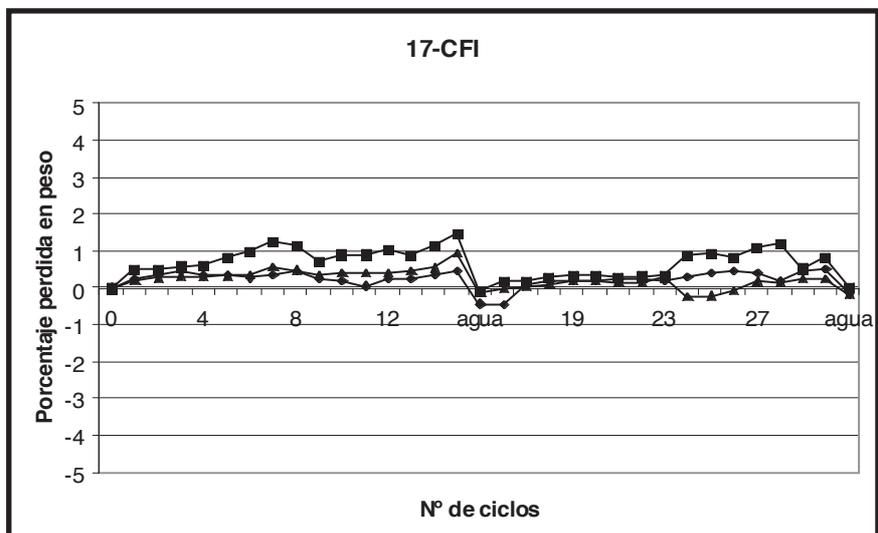
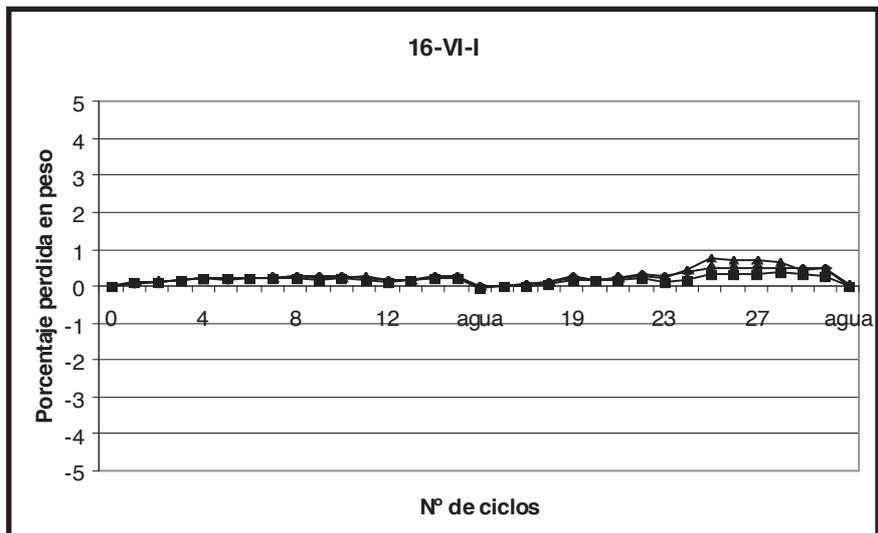
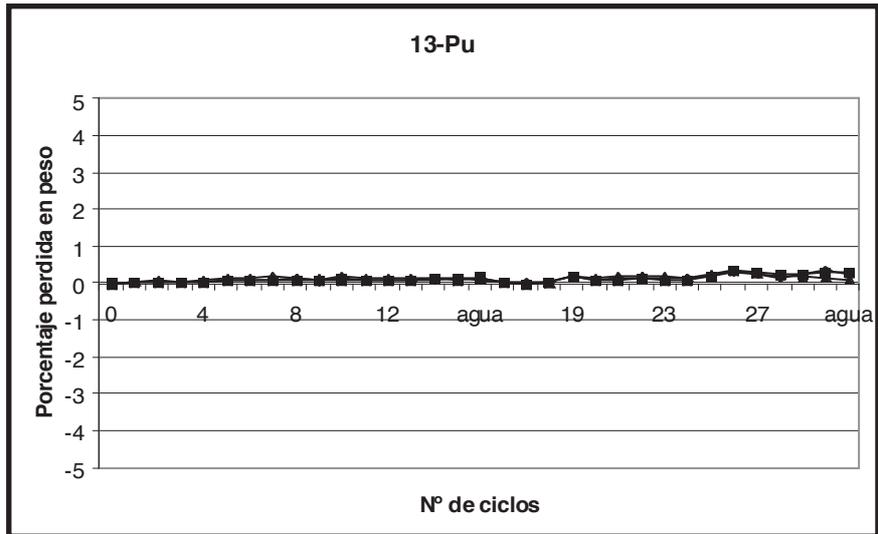
En este anexo se recogen las gráficas de pérdida en peso durante el ensayo de cristalización de sales para todas las rocas caracterizadas, así como las gráficas de pérdida en peso para las rocas 6-Un, 7-Ay, 10-Az y 31-B12 tras aplicar los diferentes tratamientos de consolidación.

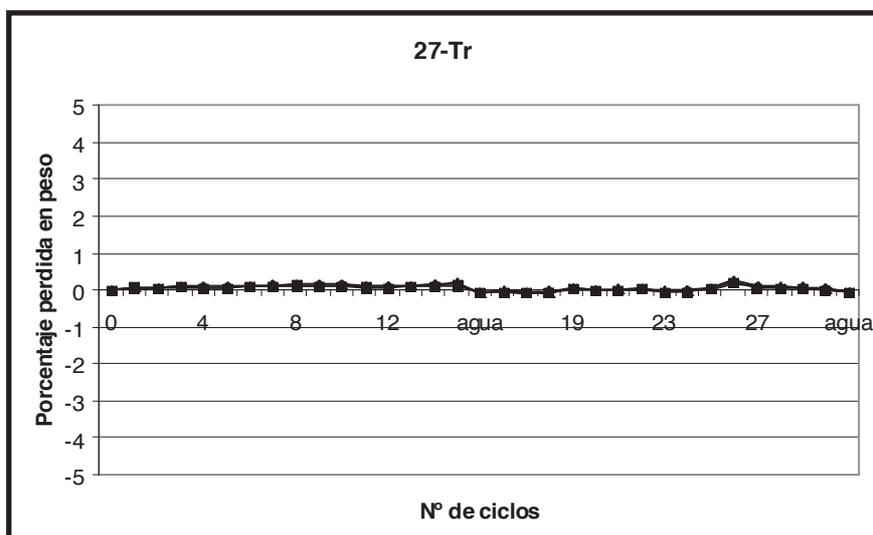
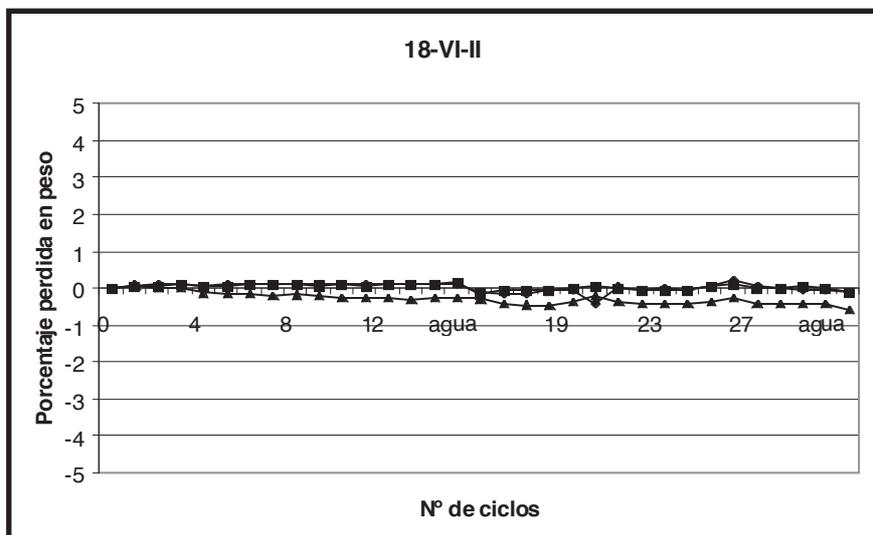
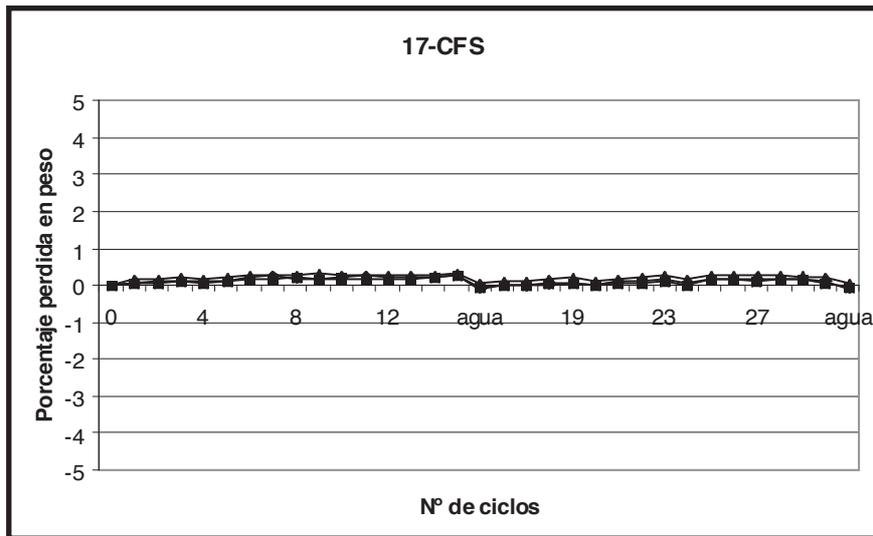
El número de ciclos realizados ha sido de 15 en el caso de las rocas detríticas y de 30 en el caso de las rocas carbonatadas. El peso final de las probetas al término del ensayo es el peso seco tras su lavado con agua desionizada durante una semana. El lavado con agua desionizada se ha realizado tras el ciclo 15 en las arenitas y tras los ciclos 15 y 30 en las rocas carbonatadas.

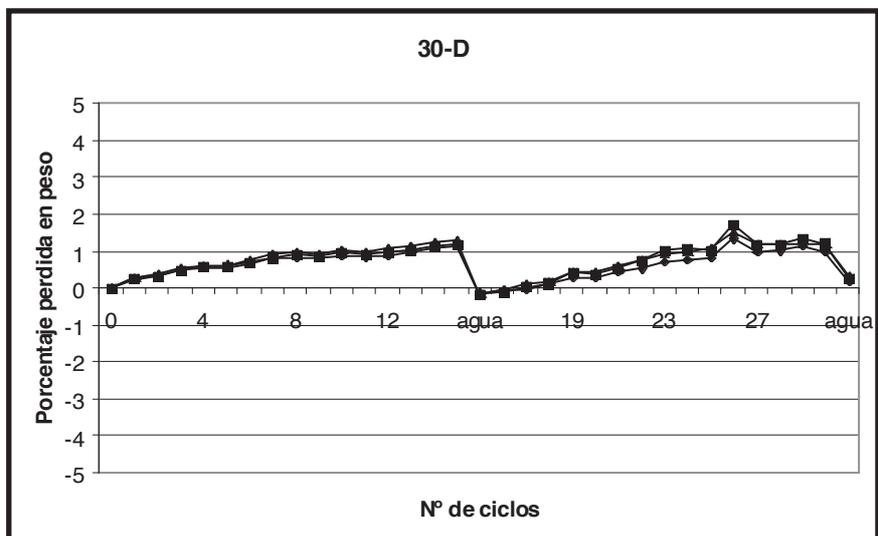
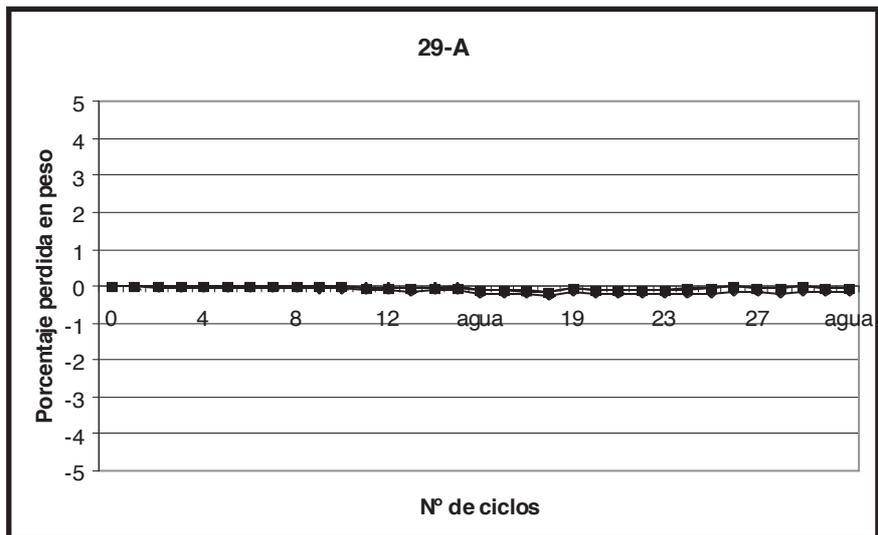
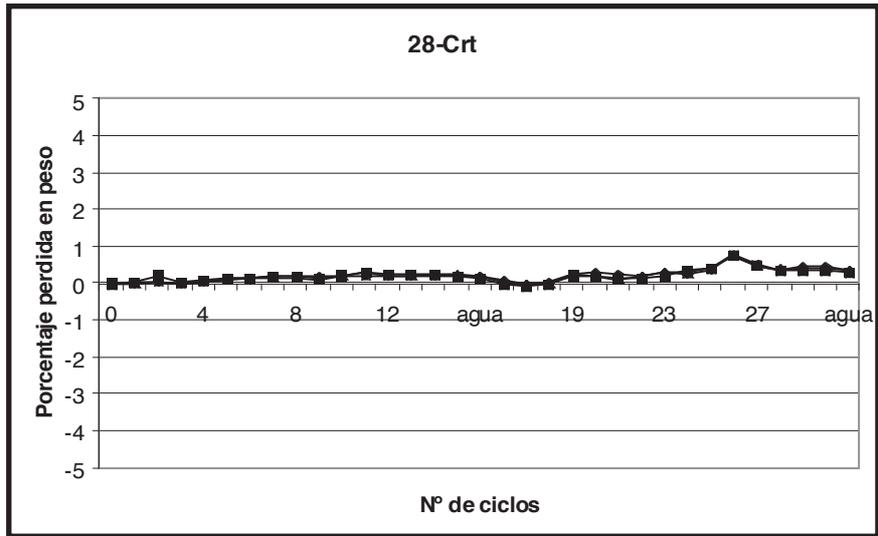
Las gráficas de pérdida en peso tras aplicar los consolidantes se muestran para cada uno de los consolidantes y formas de aplicación (SL- silicato de litio, SK- silicato de potasio, Pa- paraloid, In- inmersión y Br- brocha).

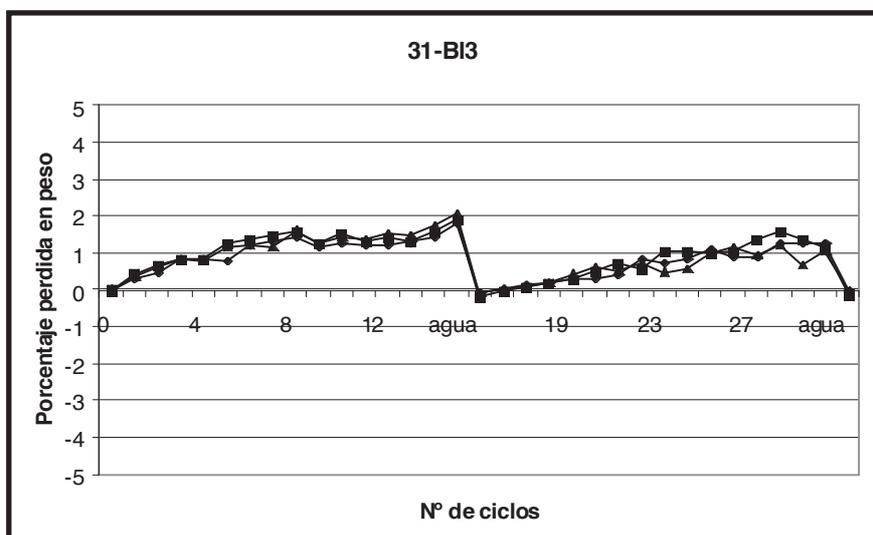
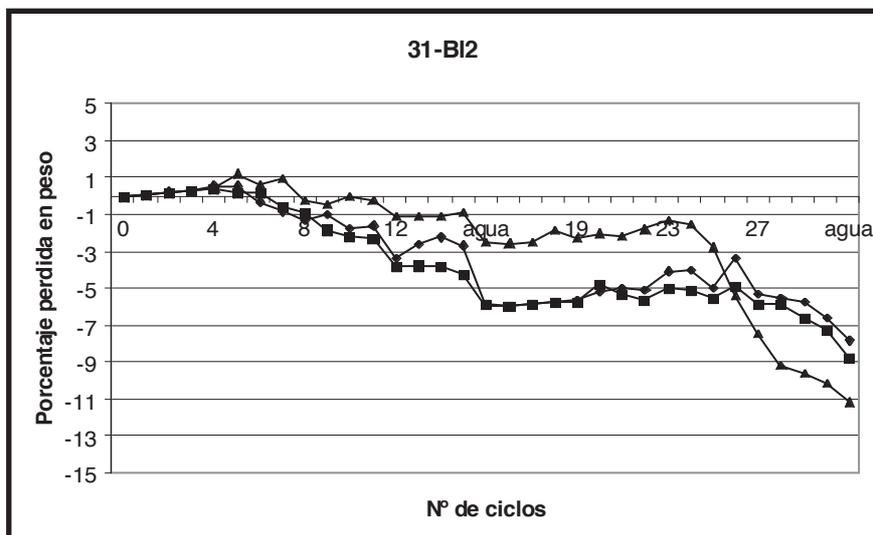
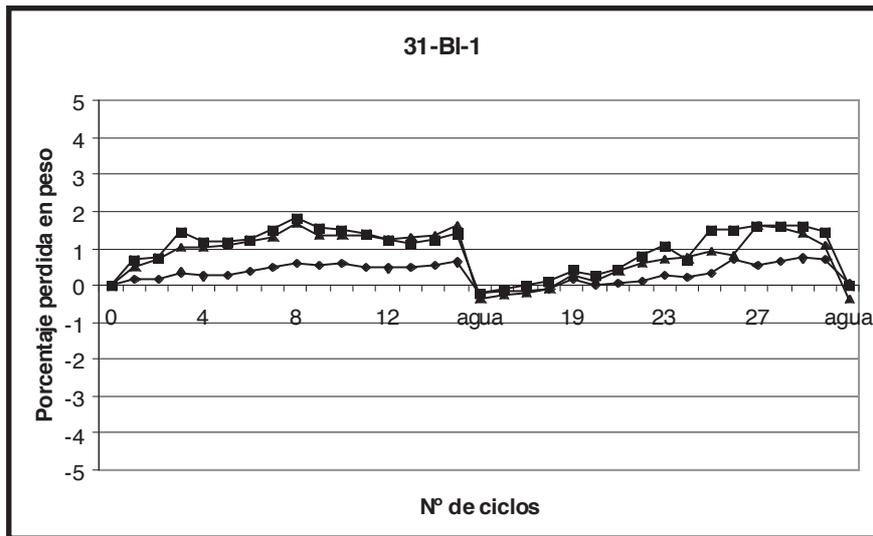




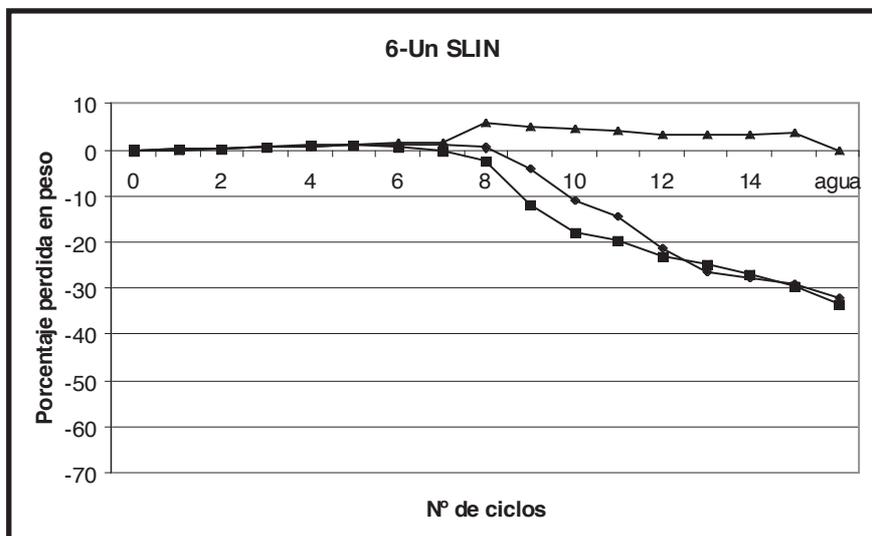
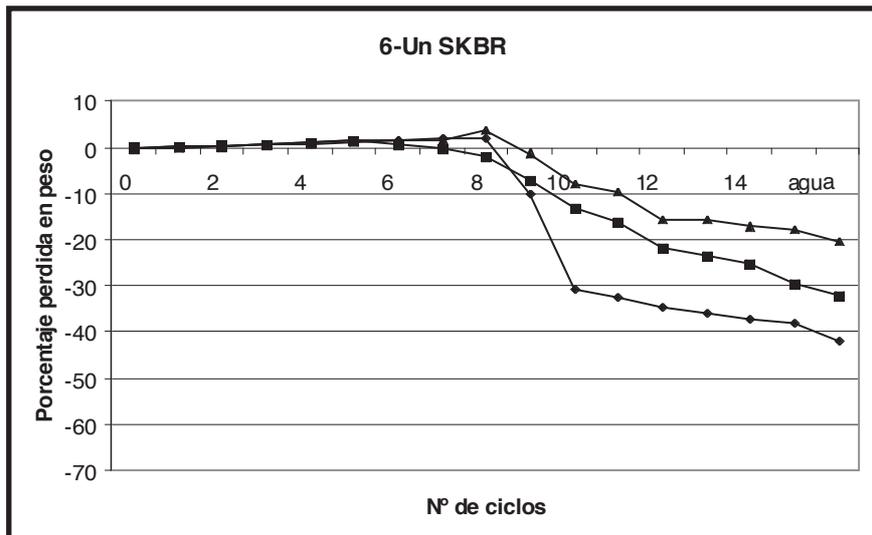
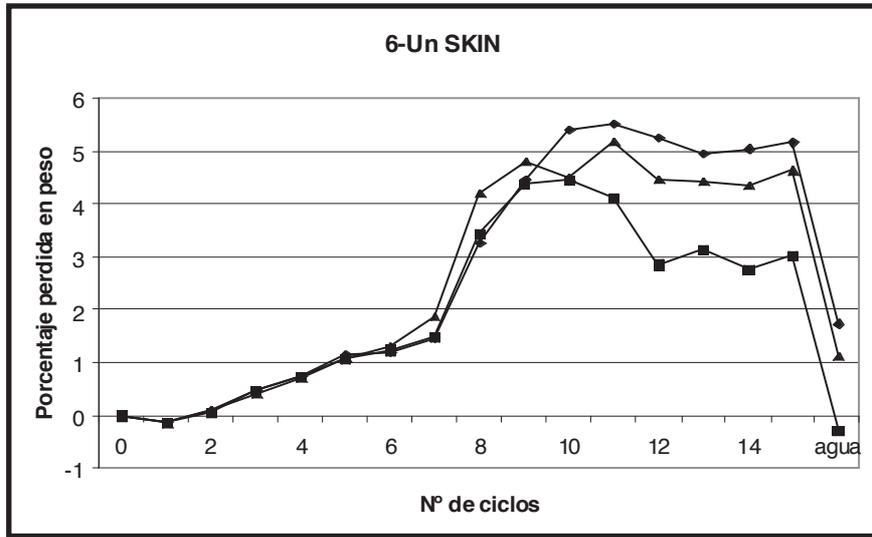


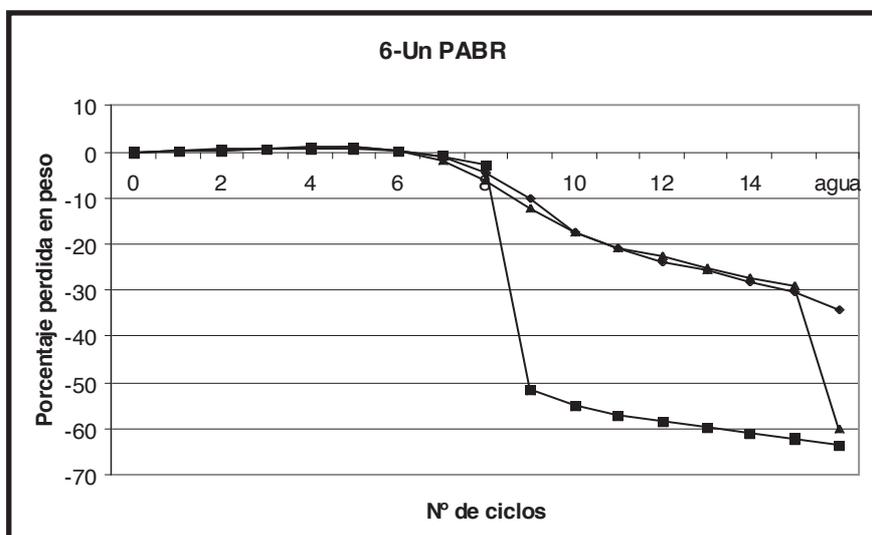
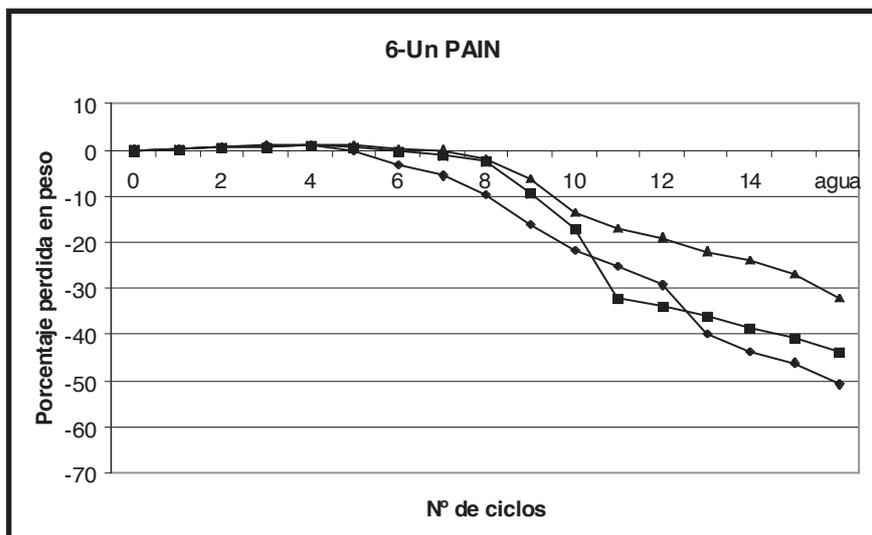
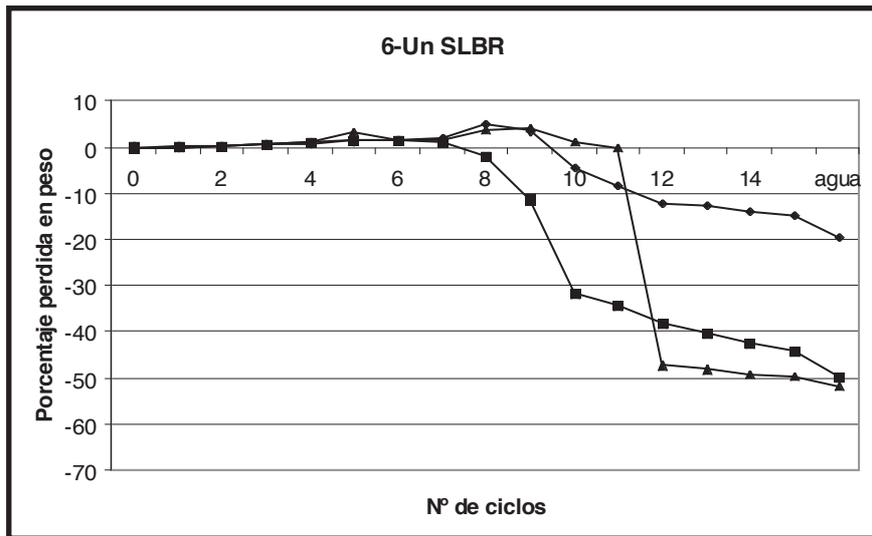




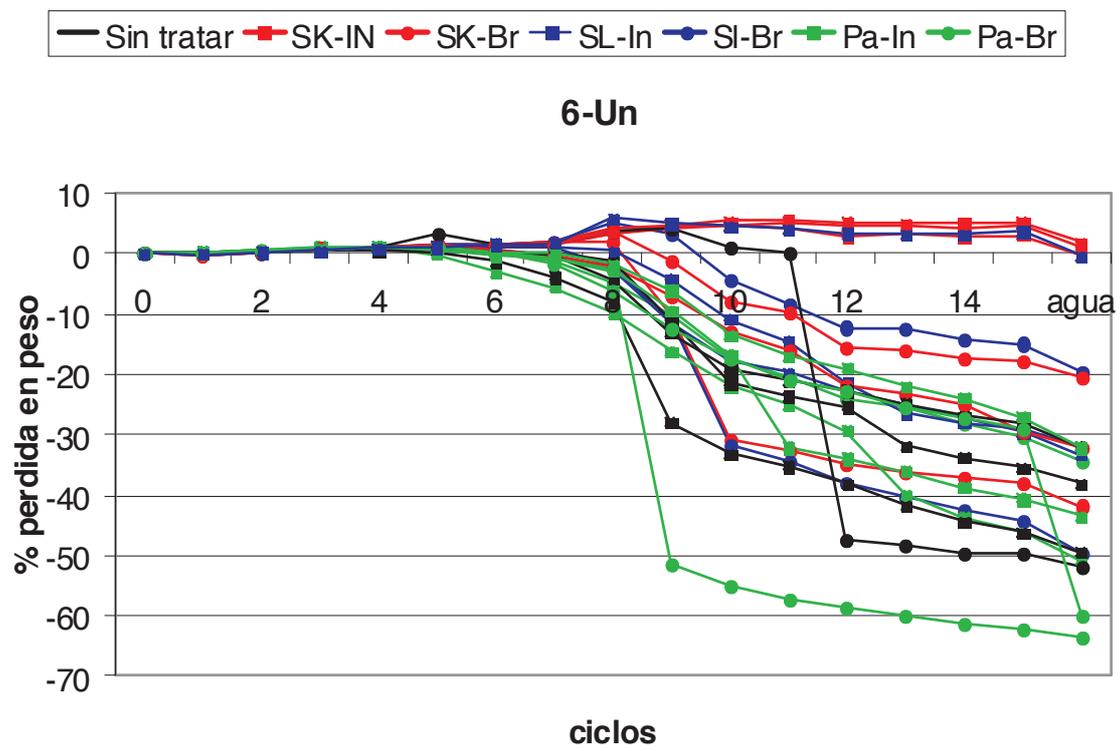


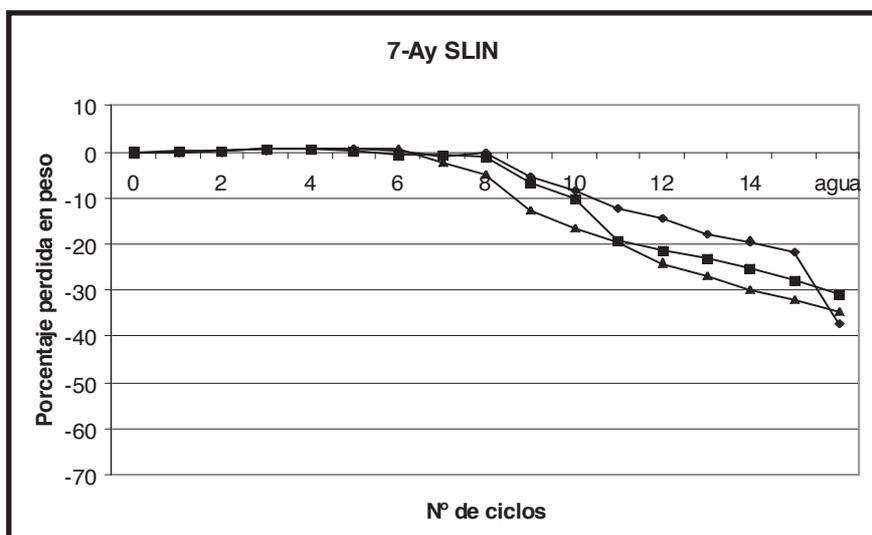
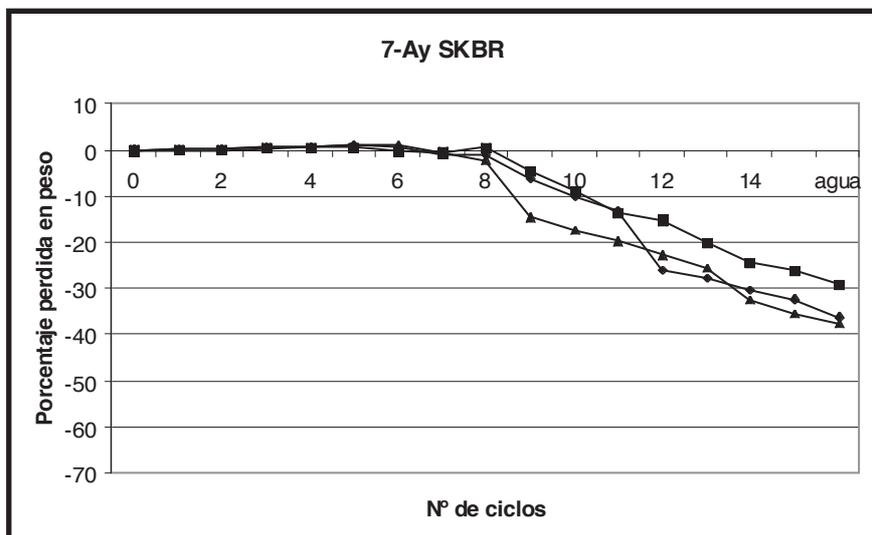
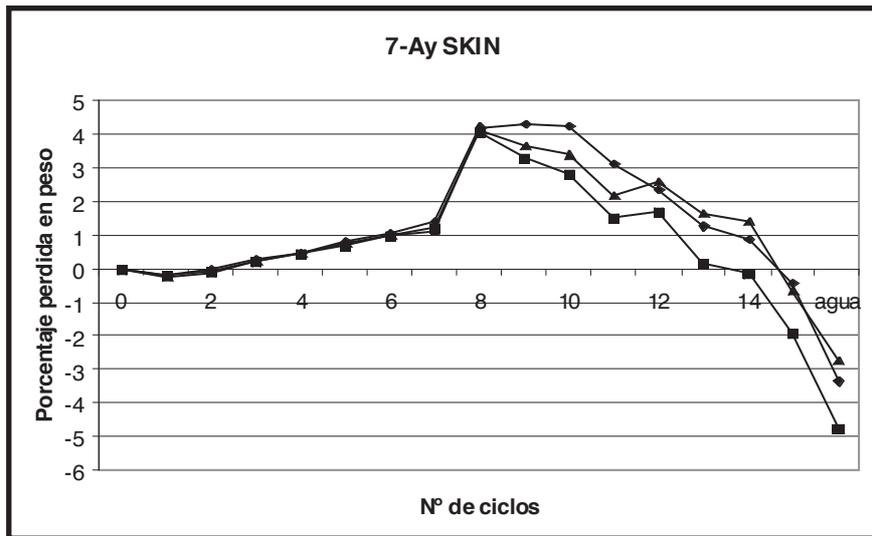
Gráficas de pérdida en peso durante el ensayo de cristalización de sales tras aplicar los tratamientos de consolidación.

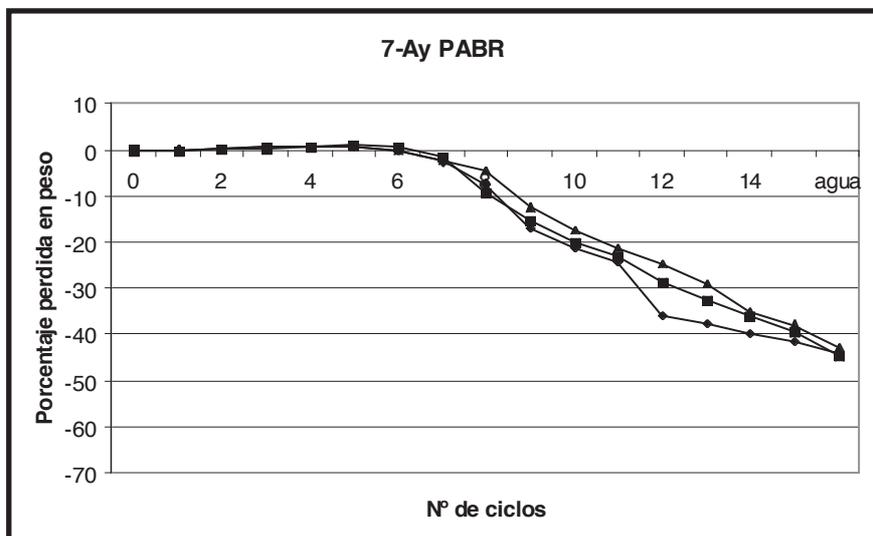
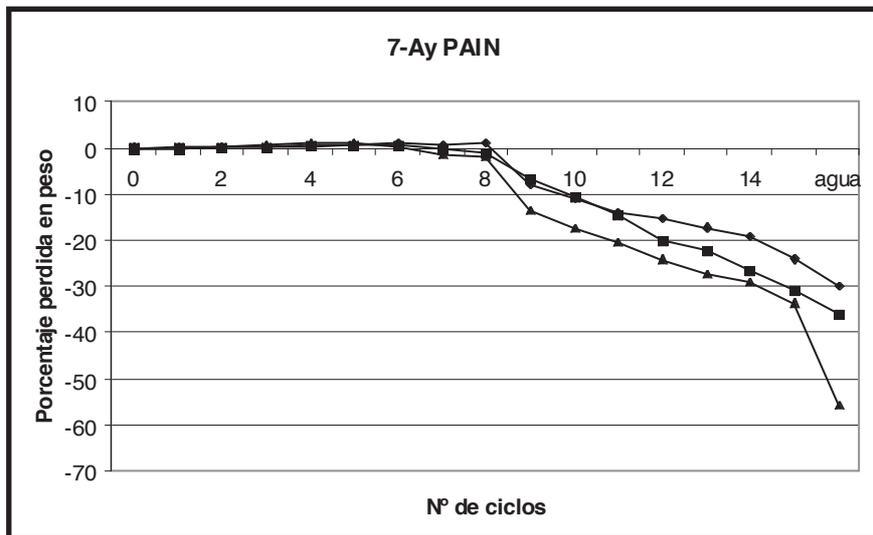
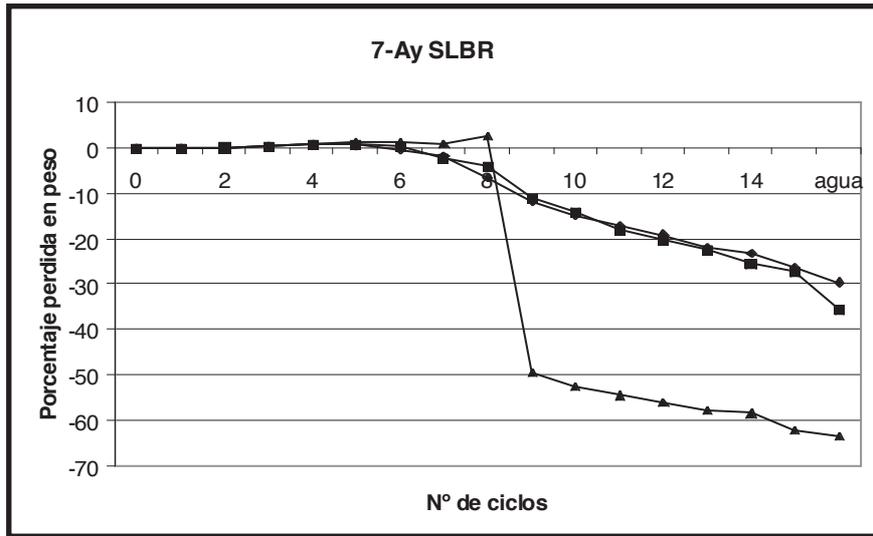




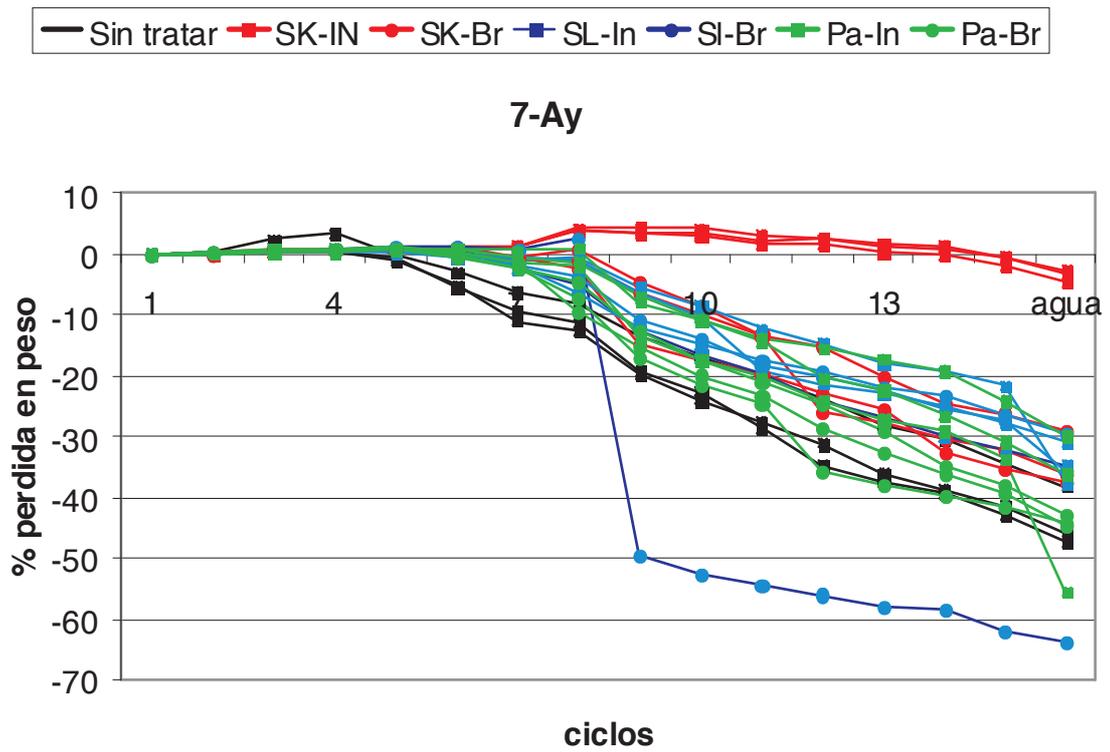
Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

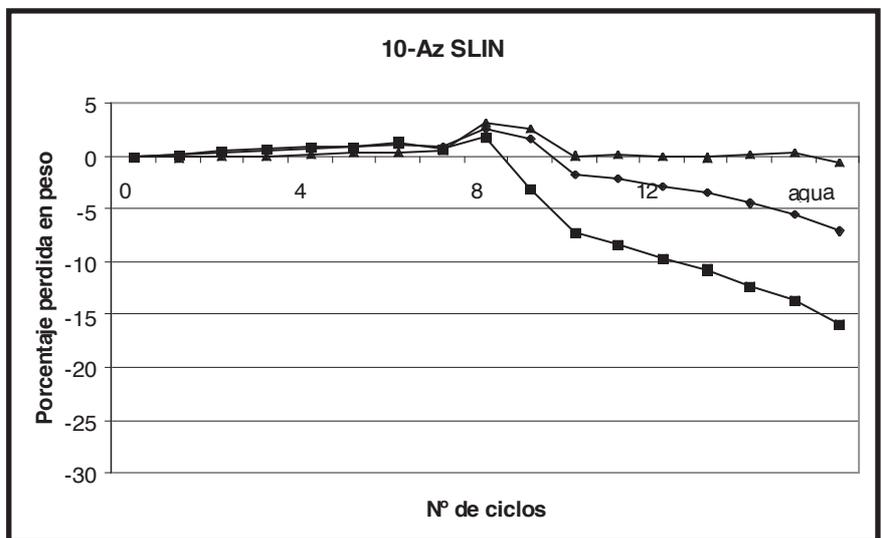
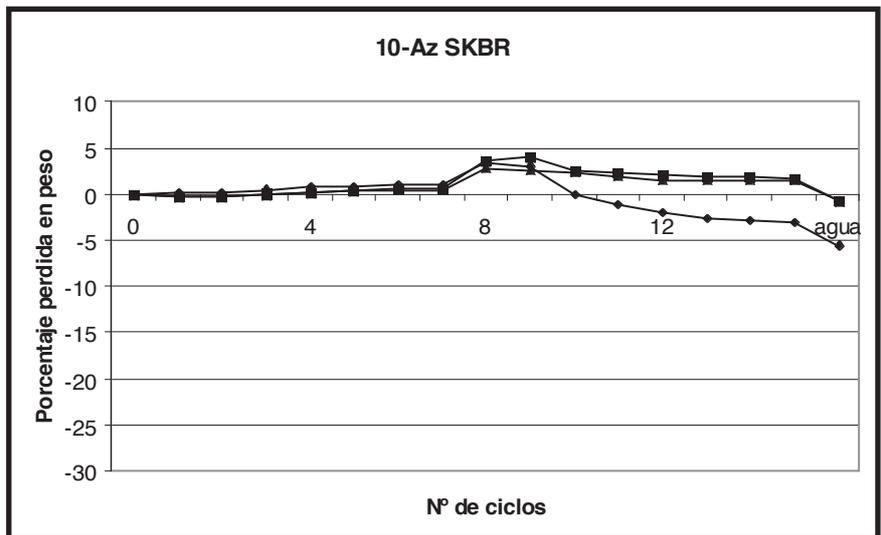
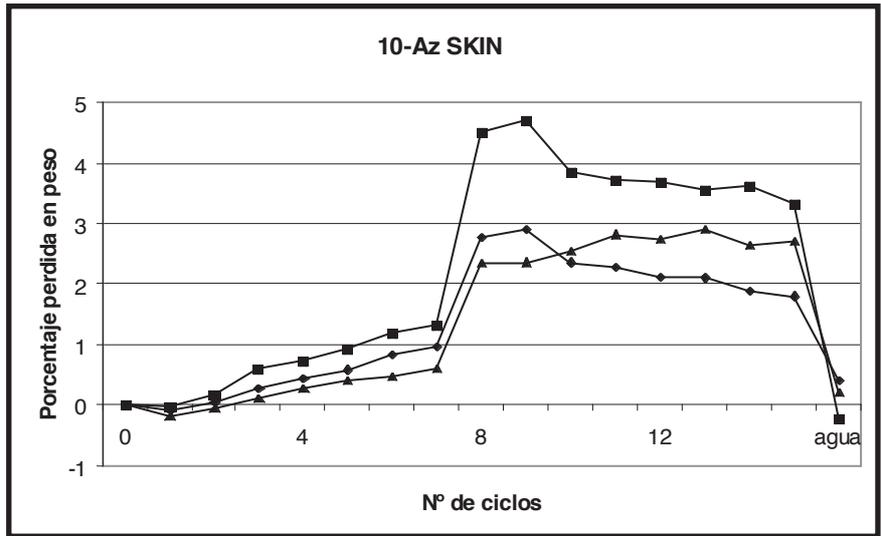


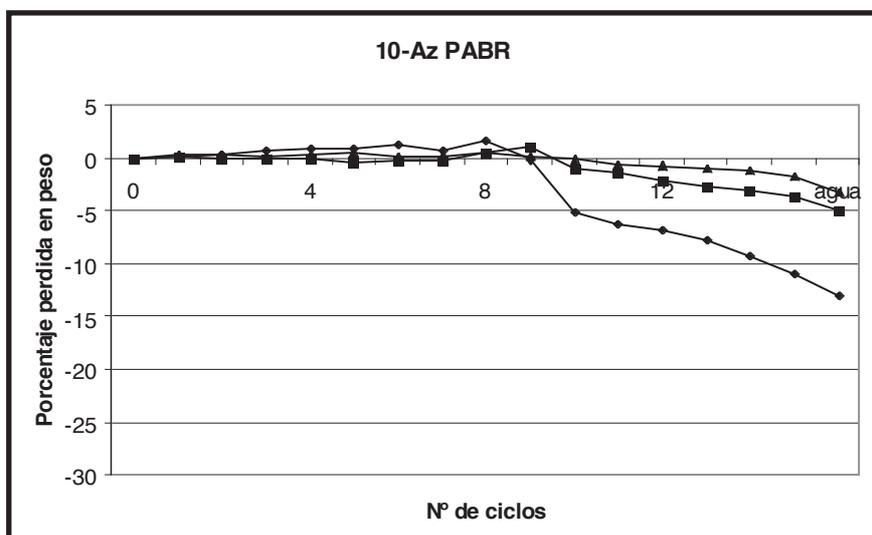
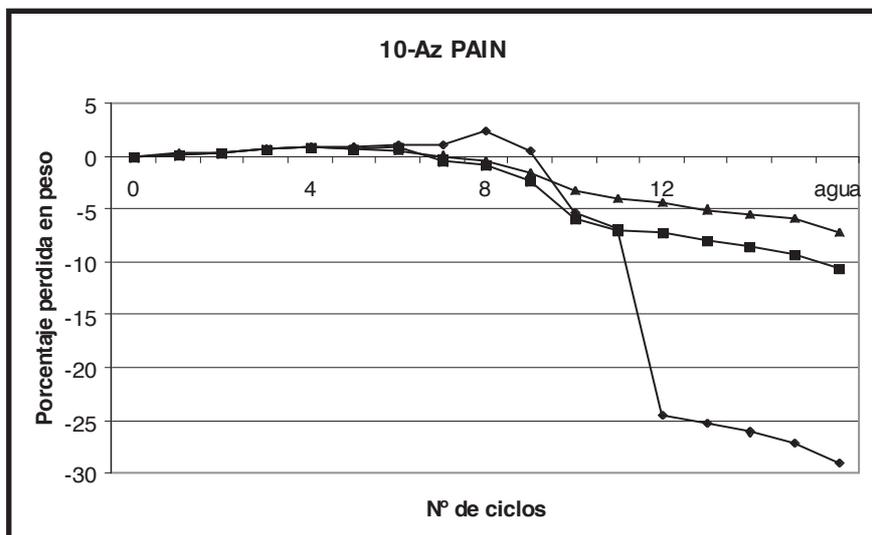
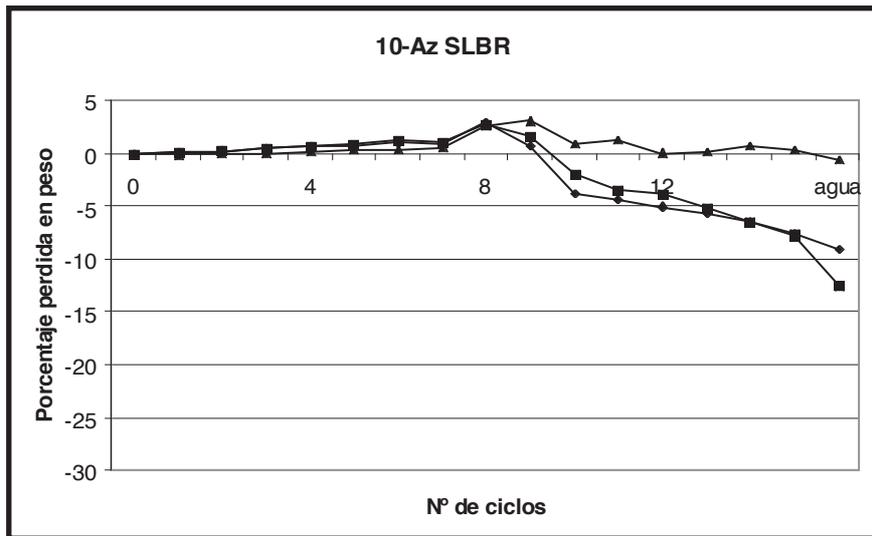




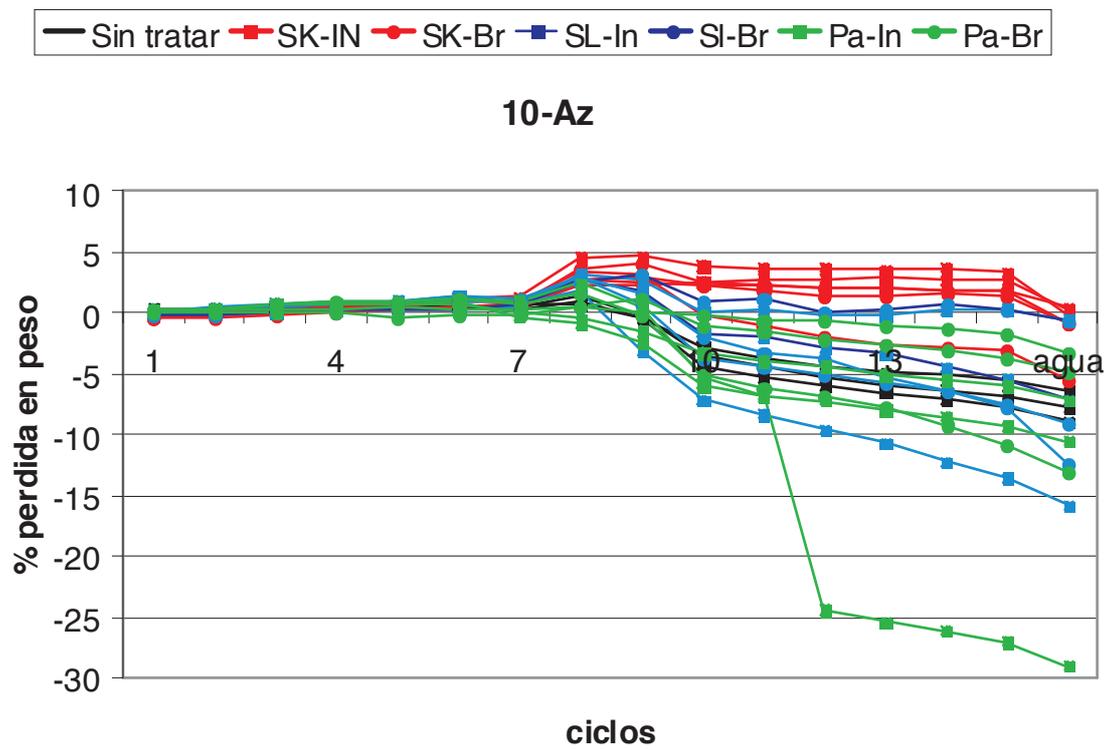
Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

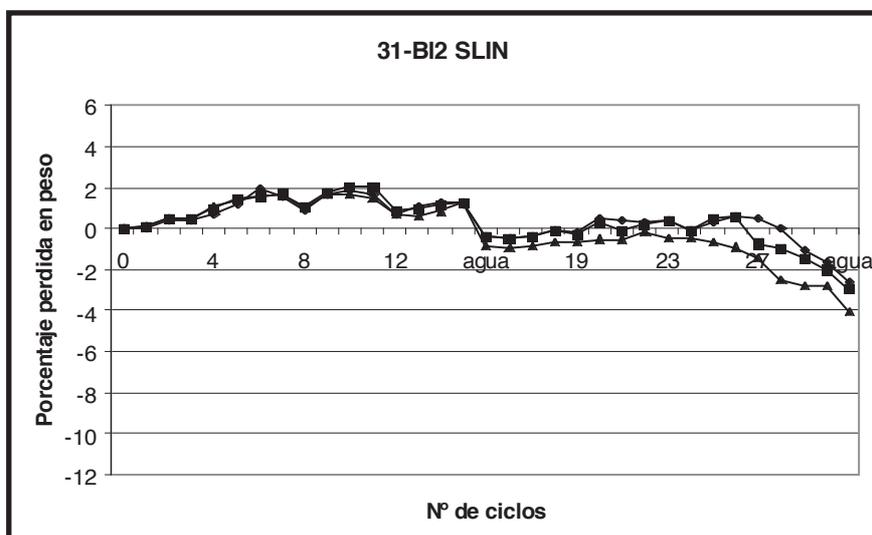
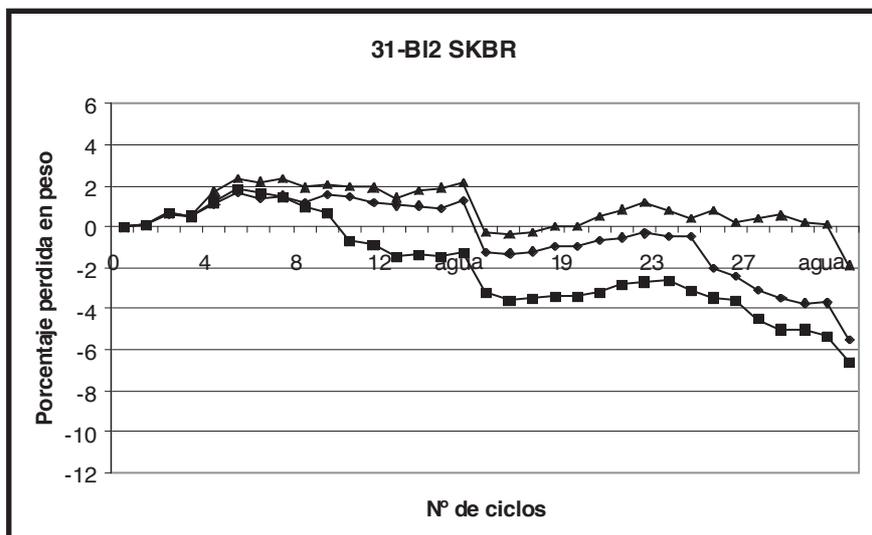
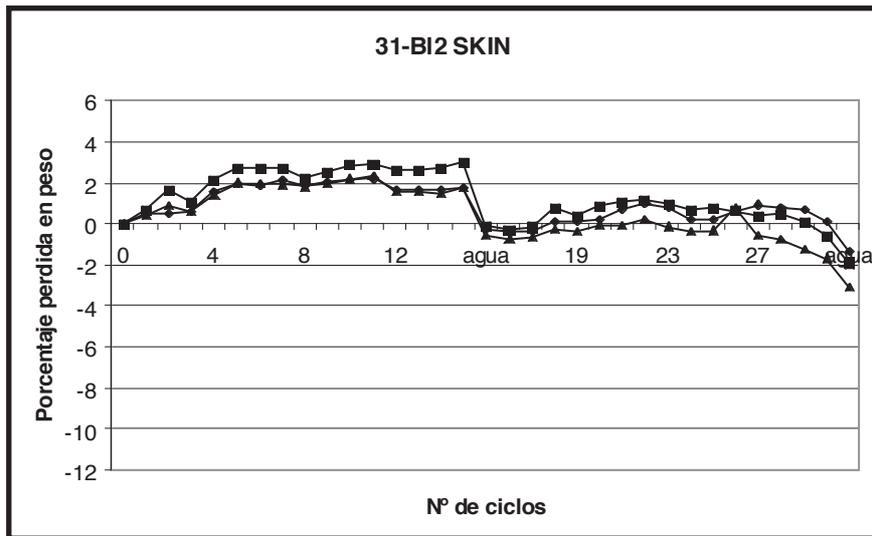


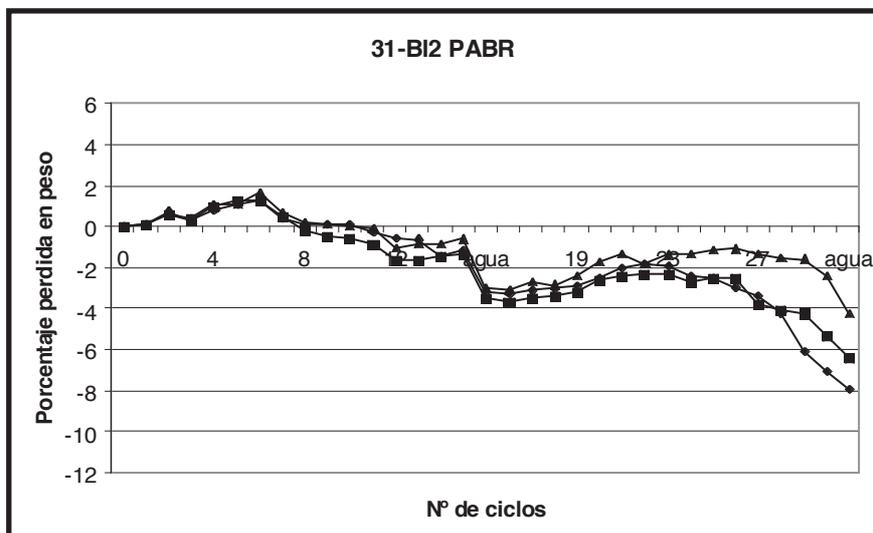
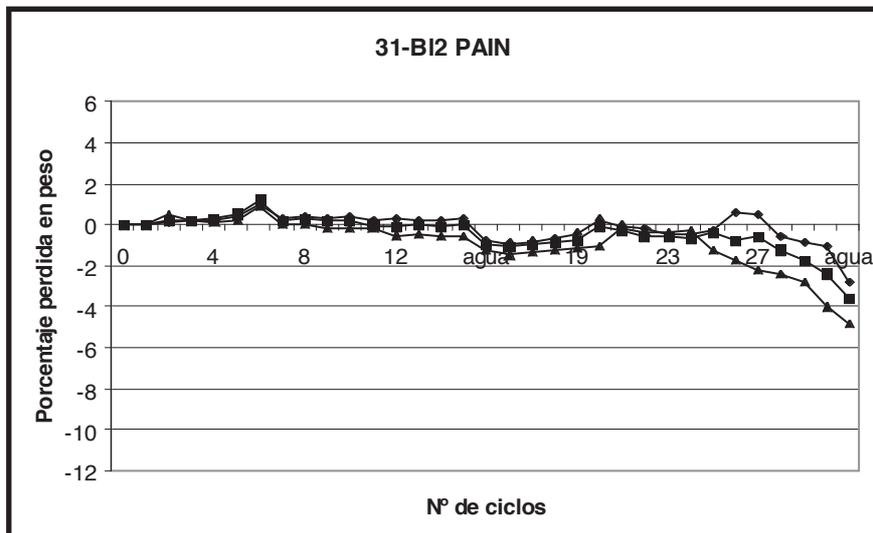
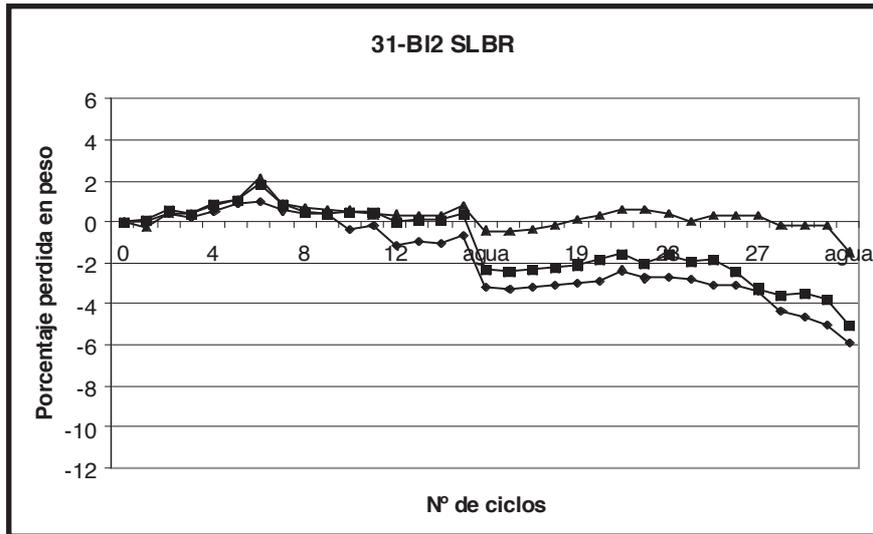




Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.







Cada curva representa el valor medio de tres probetas por tipo de consolidante y método de aplicación.

