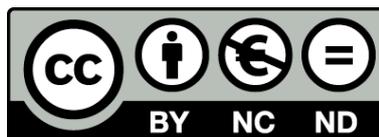




UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# **Materials pétreos de construcción y morteros sintéticos. Evaluación del comportamiento de estos materiales frente a los productos de consolidación e hidrofugación**

M. Antonia Navarro Ezquerria



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0. Spain License.**



Programa de Doctorado: Cristalografía y Mineralogía.  
Bienio: 1991-1993. UAB  
Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica.  
Facultad de Geología  
Programa de Doctorado: Ciències de la Terra. UB

# **MATERIALES PÉTREOS DE CONSTRUCCIÓN Y MORTEROS SINTÉTICOS. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ESTOS MATERIALES FRENTE A LOS PRODUCTOS DE CONSOLIDACIÓN E HIDROFUGACIÓN.**

Memoria presentada por

**Antonia Navarro Ezquerra**

para optar al título de  
Doctor por la Universidad de Barcelona

Esta Tesis ha sido realizada bajo la dirección de

**Dr. Domingo Gimeno Torrente**

Del Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica  
Facultad de Geología  
Junio 2007

**El Autor,**

**El Director,**

**Antonia Navarro Ezquerra**

**Domingo Gimeno Torrente**

Saber que se sabe lo que se sabe y  
que no se sabe lo que no se sabe; he  
aquí el verdadero saber.  
Confucio (551 aC- 478 aC)

Cristall, mineral, roca, pedra, morter,  
calç, recristal·lització, ...  
Sempre evolucionem, sense oblidar  
el què ja hem après.

## AGRADECIMIENTOS

Por fin he conseguido acabar este tema; me parecía exagerado que tú, José Luís Prada, tardaras tanto en acabar la tuya, pero como ves te he ganado. Gracias por tus enseñanzas, apoyo y discusiones, que me han servido de mucho para poder evolucionar en este campo.

La puerta a esta nueva visión de la geología me la abriste tú, Antonio Valenciano, cuando nos insististe en que nos apuntáramos a un curso que se hacía en el ICE, en el edificio antiguo de la universidad, que lo daba una señora que, aún siendo de Barcelona, era profesora en Oviedo, y que veía la geología con unas gafas diferentes. Sí Rosa M<sup>a</sup> Esbert, ya en el año 1987 te empezamos a seguir la pista. Desde entonces, tú has sido mi referente; siempre me ha gustado tu forma de explicar estos temas a aquellos que no tienen nuestra formación, y cómo te las ingenias para que te entiendan. Gracias por haberme enseñado tantas cosas, y por contestar al teléfono cada vez que te he necesitado, aunque haya sido para temas tan diferentes, y por tu paciencia en esperar este documento que por fin te enseñé acabado; tus ánimos me han ayudado a concluirlo.

De mi estancia en la Autónoma tengo guardados buenos momentos, aunque también algunos de no tan buenos (estos últimos casi ya no los encuentro).

Gràcies Montse Argemí, Josep Girbal, Rosa Rocabayera, Montse Pugés, Victoria de Laorden i José Luís Prada; varem viure una etapa molt bonica, amb moltes il·lusions i varem aprendre molt tots plegats, els uns dels altres.

Gràcies Aureli Àlvarez, perquè em vas donar l'oportunitat d'entrar en aquest món que m'apassiona; em vas ensenyar coses molt útils de la vida que després he pogut utilitzar. No varem tenir un final feliç, però hores d'ara això no importa. Per mi, segueixes sent un dels millors coneixedors de marbres antics.

Gràcies Jaume Ques i David Gómez, em vareu ajudar a que la meva estança fos més còmoda, i em aquells moments amb problemes em vareu donar un cop de ma.

A tu, Joan Parrot, et dec molt. Em vas subvencionar el meu aprenentatge, em vas ensenyar moltes coses de química, però sobretot les nostres xerrades m'obrien els ulls; recordo amb bon regust quan tots dos somiaven tractaments i assaigs nous, que mai varem poder realitzar. Sé que a tu et va costar el canvi, i que va comportar que marxessis lluny; em vaig perdre les tardes de discussió, però he pogut conèixer a Joan Josep Ayuso, Francesc Chicot, Jordi Cabrisés, Gregori Albacar, entre d'altres, amb els quals també he après moltes coses, i he pogut seguir discutint.

Però és al Labo on la meva vida ha canviat substancialment en tots els aspectes. He après a parlar "per que m'entenguin", tot i que de vegades se m'escapa alguna parrafada no tan entenedora; he trobat el meu lloc a la vida professional, però també a la humana. Gràcies Joan Ramon Rosell, per creure amb mi i per donar-me l'oportunitat d'evolucionar; gràcies per ser com ets i per deixar-me participar en les teves il·lusions; estar a la teva vora m'ha fet créixer i ser una mica més experta en algun tema. A vosaltres dos, Joan Leiva i Minerva Embuena, també us dec molt, tant a nivell professional com humà (sobretot aquest segon nivell); m'heu ajudat a canviar i a evolucionar.

A ti, Sonia Ramos, que has estado a las verdes y a las maduras conmigo, espero que por fin encuentres tu sitio.

A vosotros, Joaquín Montón, Judith Ramírez, Imma Rodríguez y Ana Lacasta, que entrasteis en mi vida profesional más tarde, también quiero agradeceros las aportaciones de conocimiento que me habéis dado: comentar con vosotros diversos temas siempre es enriquecedor.

De tots els becaris que han anat passant per aquí, i que hores d'ara ja heu crescut i que ja us heu posat les capes, vull mencionar de forma especial al JuanDi, Marc i Edgar; vosaltres també heu contribuït al meu desenvolupament en aquest nou mon.

Y cómo no, darte las gracias a ti, Domingo Gimeno. Me acogiste cuando más lo necesitaba, y me has ayudado a que este trabajo se acabe. Nos estas enseñando a que por mucho que investiguemos, si no publicamos no llega al resto de la gente. Eres mi conexión con el mundo de la geología “sensu estricto”, y siempre estás cuando te necesito.

Por último, agradezco el apoyo y la ayuda de mi familia; como veis, ahora ya he conseguido acabar este trabajo, gracias a vosotros.

Cierro así la caja de una etapa de mi vida.

Espero que vosaltres, Andreu i Laia, pugueu remenar aquesta caixa i pugueu extreure les coses bones que hi ha, i que us serveixin per poder créixer.

<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
1.1 Generalidades .....	16
1.2 Objetivo.....	21
1.3 Antecedentes .....	23
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>28</b>
2.1 Caracterización petrográfica .....	28
2.2 Caracterización petrofísica y envejecimiento artificial acelerado .....	29
2.2.1 Caracterización petrofísica .....	29
2.2.1.1 Absorción al vacío .....	29
2.2.1.2 Succión capilar.....	30
2.2.1.3 Desorción .....	30
2.2.1.4 Absorción libre.....	31
2.2.1.5 Permeabilidad al vapor de agua .....	31
2.2.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	32
2.2.2.1 Cristalización de sales .....	32
2.2.2.2 Hielo /deshielo .....	33
2.3 Modificación de las propiedades petrofísicas y de la variación porcentual de masa tras el envejecimiento artificial acelerado del material tratado.....	34
2.4 Modificación de algunas propiedades petrofísicas tras el envejecimiento artificial acelerado.....	34
<b>3 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
3.1 Caracterización petrográfica de la Arenisca del Figaró .....	35
3.2 Caracterización petrográfica de la Calcilita del Lorito.....	36
3.3 Caracterización petrográfica de la Caliza de Hontoria .....	36
3.4 Caracterización petrográfica de la Arenisca de Durango .....	38
3.5 Caracterización petrográfica de la Arenisca de Begoña.....	38
3.6 Caracterización petrográfica de la Arenisca de Montjuïc.....	39
3.7 Caracterización petrográfica del mortero sintético Parrot's Mix nº4 .....	40
<b>4 CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA Y ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO .....</b>	<b>42</b>
4.1 Arenisca del Figaró .....	42
4.1.1 Caracterización petrofísica .....	42
4.1.2 Envejecimiento artificial acelerado mediante cristalización de sales .....	43
4.1.3 Comentario .....	44
4.2 Calcilita del Lorito.....	48
4.2.1 Caracterización petrofísica .....	48
4.2.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	48
4.2.3 Comentario .....	49

<b>4.3 Caliza de Hontoria .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Caracterización petrofísica .....	53
4.3.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	53
4.3.3 Comentario .....	54
<b>4.4 Arenisca de Durango.....</b>	<b>58</b>
4.4.1 Caracterización petrofísica .....	58
4.4.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	58
4.4.3 Comentario .....	59
<b>4.5 Arenisca de Begoña.....</b>	<b>63</b>
4.5.1 Caracterización petrofísica .....	63
4.5.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	63
4.5.3 Comentario .....	64
<b>4.6 Arenisca de Montjuïc.....</b>	<b>68</b>
4.6.1 Caracterización petrofísica .....	68
4.6.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	68
4.6.2.1 Cristalización de sulfato sódico.....	68
4.6.2.2 Hielo – deshielo .....	68
4.6.3 Comentario .....	69
<b>4.7 Parrot's Mix nº4 .....</b>	<b>74</b>
4.7.1 Caracterización petrofísica .....	74
4.7.2 Envejecimiento artificial acelerado .....	74
4.7.3 Comentario .....	75
<b>4.8 RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA Y ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO.....</b>	<b>79</b>
<b>5 TRATAMIENTO DE LAS ROCAS.....</b>	<b>81</b>
<b>6 MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS Y VARIACIÓN PORCENTUAL DE MASA TRAS EL ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO, TRAS LA APLICACIÓN DE PRODUCTOS CONSERVATIVOS ...</b>	<b>83</b>
<b>6.1 Arenisca del Figaró.....</b>	<b>83</b>
6.1.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	83
6.1.2 Comentario .....	87
<b>6.2 Calcilita del Lorito.....</b>	<b>94</b>
6.2.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	94
6.2.2 Comentario .....	98
<b>6.3 Caliza de Hontoria .....</b>	<b>104</b>
6.3.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	104
6.3.2 Comentario .....	107
<b>6.4 Arenisca de Durango.....</b>	<b>112</b>
6.4.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	112
6.4.2 Comentario .....	115
<b>6.5 Arenisca de Begoña.....</b>	<b>119</b>
6.5.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	119
6.5.2 Comentario .....	122
<b>6.6 Arenisca de Montjuïc.....</b>	<b>127</b>
6.6.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	127
6.6.2 Comentarios.....	133

<b>6.7 Parrot's Mix nº4 .....</b>	<b>137</b>
6.7.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado .....	137
6.7.2 Comentario .....	140
<b>7 MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS TRAS EL ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO .....</b>	<b>144</b>
<b>7.1 Arenisca del Figaró .....</b>	<b>144</b>
7.1.1 Propiedades petrofísicas .....	144
7.1.2 Comentario .....	145
<b>7.2 Calcilita del Lorito.....</b>	<b>151</b>
7.2.1 Propiedades petrofísicas .....	151
7.2.2 Comentario .....	151
<b>7.3 Caliza de Hontoria .....</b>	<b>155</b>
7.3.1 Propiedades petrofísicas .....	155
7.3.2 Comentario .....	156
<b>7.4 Arenisca de Durango.....</b>	<b>158</b>
7.4.1 Propiedades petrofísicas .....	158
7.4.2 Comentario .....	158
<b>7.5 Arenisca de Begoña.....</b>	<b>161</b>
7.5.1 Propiedades petrofísicas .....	161
7.5.2 Comentario .....	161
<b>7.6 Arenisca de Montjuïc.....</b>	<b>164</b>
7.6.1 Propiedades petrofísicas .....	164
7.6.2 Comentario .....	165
<b>8 CONCLUSIONES.....</b>	<b>168</b>
<b>9 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>171</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca del Figaró.....	42
<b>Tabla 2.</b> Propiedades petrofísicas de la calcilitita del Lorito.....	48
<b>Tabla 3.</b> Propiedades petrofísicas de la caliza de Hontoria.....	53
<b>Tabla 4.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Durango .....	58
<b>Tabla 5.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Begoña .....	63
<b>Tabla 6.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Montjuïc.....	68
<b>Tabla 7.</b> Propiedades petrofísicas de Parrot's Mix nº4. ....	74
<b>Tabla 8.</b> Propiedades petrofísicas de los siete tipos de roca estudiados.....	79
<b>Tabla 9.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca del Figaró tratada con CA-PI, y con PP-PI, por 6 y 4 caras. ....	83
<b>Tabla 10.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca del Figaró tratada con CA, PP y PI. ....	87
<b>Tabla 11.</b> Propiedades petrofísicas de la calcilitita del Lorito tratada con CA-PI, y con PP-PI, por 6 y 4 caras. ....	94
<b>Tabla 12.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la calcilitita del Lorito tratada con CA, PP y PI. ....	98
<b>Tabla 13.</b> Propiedades petrofísicas de la caliza de Hontoria tratada con CA-PI y con PP-PI, por 4 caras. ....	104
<b>Tabla 14.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la caliza de Hontoria tratada con CA, PP y PI.....	107
<b>Tabla 15.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Durango tratada con CAPI y con PPPI, por 4 caras.....	112
<b>Tabla 16.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca de Durango tratada con CA, PP y PI.....	115
<b>Tabla 17.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Begoña tratada con CA-PI y con PP-PI, por 4 caras.....	119
<b>Tabla 18.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca de Begoña tratada con CA, PP y PI.....	122
<b>Tabla 19.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Montjuïc tratada con CA-PI, CF-PI, y TVTC, por 4 caras. ....	127
<b>Tabla 20.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca de Begoña tratada con CA, PP y PI.....	133
<b>Tabla 21.</b> Propiedades petrofísicas de Parrot's Mix nº4 tratada con CA-PI y con PP-PI, por 4 caras. ....	137
<b>Tabla 22.</b> Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de Parrot's Mix nº4 tratado con CA, PP y PI.....	139
<b>Tabla 23.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca del Figaró tratada con CA-PI y con PP-PI por 6 y 4 caras.....	144
<b>Tabla 24.</b> Coeficiente de absorción capilar de la calcilitita del Lorito tratada con CA-PI y PP-PI por 6 y 4 caras.....	151
<b>Tabla 25.</b> Propiedades petrofísicas de la caliza de Hontoria tratada con CA-PI y con PP-PI por 4 caras.....	155

<b>Tabla 26.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Durango tratada con CA-PI y con PP-PI por 4 caras.....	158
<b>Tabla 27.</b> Propiedades petrofísicas de la arenisca de Begoña tratada con CA-PI y con PP-PI por 4 caras.....	161
<b>Tabla 28.</b> Propiedades petrofísicas de Montjuic tratada con CF-PI, CA-PI y TV-TC, por 4 caras.....	164

## ÍNDICE DE FOTOS

<b>Foto 1.</b>	Observación “a visu” de la Arenisca del Figaró.....	35
<b>Foto 2.</b>	Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Arenisca del Figaró.....	35
<b>Foto 3.</b>	Observación “a visu” de la Calcilutita del Lorito.....	36
<b>Foto 4.</b>	Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Calcilutita del Lorito.....	36
<b>Foto 5.</b>	Observación “a visu” de la Caliza de Hontoria.....	37
<b>Foto 6.</b>	Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Caliza de Hontoria.....	37
<b>Foto 7.</b>	Observación “a visu” de la Arenisca de Durango.....	38
<b>Foto 8.</b>	Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Arenisca de Durango.....	38
<b>Foto 9.</b>	Observación “a visu” de la Arenisca de Begoña.....	39
<b>Foto 10.</b>	Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Arenisca de Begoña.....	39
<b>Foto 11.</b>	Observación “a visu” de la Arenisca de Montjuïc.....	40
<b>Foto 12.</b>	Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Arenisca de Montjuïc.....	40
<b>Foto 13.</b>	Observación “a visu” de Parrot’s Mix 4.....	41
<b>Foto 14.</b>	Observación a microscopio electrónico de Parrot’s Mix 4.....	41
<b>Foto 15.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	43
<b>Foto 16.</b>	Probetas envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	44
<b>Foto 17.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.....	49
<b>Foto 18.</b>	Probetas envejecidas de la Calcilutita del Lorito.....	49
<b>Foto 19.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria.....	54
<b>Foto 20.</b>	Probetas envejecidas de la Caliza de Hontoria.....	54
<b>Foto 21.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango.....	59
<b>Foto 22.</b>	Probetas envejecidas de la Arenisca de Durango.....	59
<b>Foto 23.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña.....	64
<b>Foto 24.</b>	Probetas envejecidas de la Arenisca de Begoña.....	64
<b>Foto 25.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Montjuïc.....	69
<b>Foto 26.</b>	Probetas envejecidas, por cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.....	69
<b>Foto 27.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Montjuïc.....	70
<b>Foto 28.</b>	Probetas envejecidas, por hielo - deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	70
<b>Foto 29.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de Parrot’s Mix 4.....	75
<b>Foto 30.</b>	Probetas envejecidas de Parrot’s Mix 4.....	75
<b>Foto 31.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	84
<b>Foto 32.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	84
<b>Foto 33.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	84
<b>Foto 34.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	85
<b>Foto 35.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	85
<b>Foto 36.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	85
<b>Foto 37.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	86
<b>Foto 38.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	86

<b>Foto 39.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró. ....	86
<b>Foto 40.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.....	87
<b>Foto 41.</b>	Probetas antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.....	95
<b>Foto 42.</b>	Probetas envejecidas de la Calcilutita del Lorito. ....	95
<b>Foto 43.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito. ....	95
<b>Foto 44.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito. .	96
<b>Foto 45.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito. ....	96
<b>Foto 46.</b>	Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito. .	96
<b>Foto 47.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito. ....	97
<b>Foto 48.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito....	97
<b>Foto 49.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito. ....	97
<b>Foto 50.</b>	Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito....	97
<b>Foto 51.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria.....	105
<b>Foto 52.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas de la Caliza de Hontoria.....	105
<b>Foto 53.</b>	Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria...	106
<b>Foto 54.</b>	Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de la Caliza de Hontoria. ....	106
<b>Foto 55.</b>	Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria...	106
<b>Foto 56.</b>	Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de la Caliza de Hontoria. ....	107
<b>Foto 57.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango. ....	113
<b>Foto 58.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas de la Arenisca de Durango.....	113
<b>Foto 59.</b>	Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango. ....	114
<b>Foto 60.</b>	Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de la Arenisca de Durango.....	114
<b>Foto 61.</b>	Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango. ....	114
<b>Foto 62.</b>	Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de la Arenisca de Durango.....	115
<b>Foto 63.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña. ....	120
<b>Foto 64.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas de la Arenisca de Begoña.....	120
<b>Foto 65.</b>	Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña. ....	121
<b>Foto 66.</b>	Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de la Arenisca de Begoña. ....	121
<b>Foto 67.</b>	Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña..	121
<b>Foto 68.</b>	Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de la Arenisca de Begoña. ....	122
<b>Foto 69.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	128
<b>Foto 70.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.....	128
<b>Foto 71.</b>	Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	128
<b>Foto 72.</b>	Probetas tratadas con CAPI, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	129
<b>Foto 73.</b>	Probetas tratadas con CFPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	129
<b>Foto 74.</b>	Probetas tratadas con CFPI, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	129

<b>Foto 75.</b>	Probetas tratadas con TVTC, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	130
<b>Foto 76.</b>	Probetas tratadas con TVTC, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc. ....	130
<b>Foto 77.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc. ....	130
<b>Foto 78.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	131
<b>Foto 79.</b>	Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	131
<b>Foto 80.</b>	Probetas tratadas con CAPI, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	131
<b>Foto 81.</b>	Probetas tratadas con CFPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	132
<b>Foto 82.</b>	Probetas tratadas con CFPI, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	132
<b>Foto 83.</b>	Probetas tratadas con TVTC, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	132
<b>Foto 84.</b>	Probetas tratadas con TVTC, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.....	133
<b>Foto 85.</b>	Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de Parrot’s Mix 4.....	138
<b>Foto 86.</b>	Probetas sin tratar, envejecidas de Parrot’s Mix 4. ....	138
<b>Foto 87.</b>	Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de Parrot’s Mix 4. ....	138
<b>Foto 88.</b>	Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de Parrot’s Mix 4. ....	135
<b>Foto 89.</b>	Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de Parrot’s Mix 4.....	139
<b>Foto 90.</b>	Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de Parrot’s Mix 4. ....	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Succión capilar de la Arenisca del Figaró.....	45
<b>Figura 2.</b> Desorción de la Arenisca del Figaró.....	45
<b>Figura 3.</b> Absorción libre de la Arenisca del Figaró.....	46
<b>Figura 4.</b> Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca del Figaró.....	46
<b>Figura 5.</b> Cristalización de sales de la Arenisca del Figaró.....	47
<b>Figura 6.</b> Succión capilar de la Calcilutita del Lorito.....	50
<b>Figura 7.</b> Desorción de la Calcilutita del Lorito.....	50
<b>Figura 8.</b> Absorción libre de la Calcilutita del Lorito.....	51
<b>Figura 9.</b> Permeabilidad al vapor de agua de la Calcilutita del Lorito.....	51
<b>Figura 10.</b> Cristalización de sales de la Calcilutita del Lorito.....	52
<b>Figura 11.</b> Succión capilar de la Caliza de Hontoria.....	55
<b>Figura 12.</b> Desorción de la Caliza de Hontoria.....	55
<b>Figura 13.</b> Absorción libre de la Caliza de Hontoria.....	56
<b>Figura 14.</b> Permeabilidad al vapor de agua de la Caliza de Hontoria.....	56
<b>Figura 15.</b> Cristalización de sales de la Caliza de Hontoria.....	57
<b>Figura 16.</b> Succión capilar de la Arenisca de Durango.....	60
<b>Figura 17.</b> Desorción de la Arenisca de Durango.....	60
<b>Figura 18.</b> Absorción libre de la Arenisca de Durango.....	61
<b>Figura 19.</b> Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Durango.....	61
<b>Figura 20.</b> Cristalización de sales de la Arenisca de Durango.....	62
<b>Figura 21.</b> Succión capilar de la Arenisca de Begoña.....	65
<b>Figura 22.</b> Desorción de la Arenisca de Begoña.....	65
<b>Figura 23.</b> Absorción libre de la Arenisca de Begoña.....	66
<b>Figura 24.</b> Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Begoña.....	66
<b>Figura 25.</b> Cristalización de sales de la Arenisca de Begoña.....	67
<b>Figura 26.</b> Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc.....	71
<b>Figura 27.</b> Desorción de la Arenisca de Montjuïc.....	71
<b>Figura 28.</b> Absorción libre de la Arenisca de Montjuïc.....	72
<b>Figura 29.</b> Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Montjuïc.....	72
<b>Figura 30.</b> Cristalización de sales de la Arenisca de Montjuïc.....	73
<b>Figura 31.</b> Succión capilar de Parrot's Mix nº4.....	76
<b>Figura 32.</b> Desorción de Parrot's Mix nº4.....	76
<b>Figura 33.</b> Absorción libre de Parrot's Mix nº4.....	77
<b>Figura 34.</b> Permeabilidad al vapor de agua de Parrot's Mix nº4.....	77
<b>Figura 35.</b> Cristalización de sales de Parrot's Mix nº4.....	78
<b>Figura 36.</b> Succión capilar de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	89
<b>Figura 37.</b> Succión capilar de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	89
<b>Figura 38.</b> Desorción de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	90
<b>Figura 39.</b> Desorción de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	90
<b>Figura 40.</b> Absorción libre de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	91
<b>Figura 41.</b> Absorción libre de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	91
<b>Figura 42.</b> Cristalización de sales de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	92

<b>Figura 43.</b>	Cristalización de sales de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	92
<b>Figura 44.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada. ....	93
<b>Figura 45.</b>	Succión capilar de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	99
<b>Figura 46.</b>	Succión capilar de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	99
<b>Figura 47.</b>	Desorción de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	100
<b>Figura 48.</b>	Desorción de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	100
<b>Figura 49.</b>	Absorción libre de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	101
<b>Figura 50.</b>	Absorción libre de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	101
<b>Figura 51.</b>	Cristalización de sales de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.....	102
<b>Figura 52.</b>	Cristalización de sales de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.....	102
<b>Figura 53.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CA, PP y PI. ....	103
<b>Figura 54.</b>	Succión capilar de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.....	109
<b>Figura 55.</b>	Desorción de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada. ....	109
<b>Figura 56.</b>	Absorción libre de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada. ....	110
<b>Figura 57.</b>	Cristalización de sales de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.....	110
<b>Figura 58.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada. ....	111
<b>Figura 59.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.....	116
<b>Figura 60.</b>	Desorción de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada. ....	116
<b>Figura 61.</b>	Absorción libre de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.....	117
<b>Figura 62.</b>	Cristalización de sales de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.....	117
<b>Figura 63.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada. ....	118
<b>Figura 64.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.....	124
<b>Figura 65.</b>	Desorción de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada. ....	124
<b>Figura 66.</b>	Absorción libre de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada. ....	125
<b>Figura 67.</b>	Cristalización de sales de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.....	125
<b>Figura 68.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada. ....	126
<b>Figura 69.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada. ....	134
<b>Figura 70.</b>	Desorción de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.....	134
<b>Figura 71.</b>	Absorción libre de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.....	135
<b>Figura 72.</b>	Cristalización de sales de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada. ....	135
<b>Figura 73.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada. ....	136
<b>Figura 74.</b>	Succión capilar de Parrot's Mix nº4, sin tratar y tratada. ....	141
<b>Figura 75.</b>	Desorción de Parrot's Mix nº4, sin tratar y tratada. ....	141
<b>Figura 76.</b>	Absorción libre de Parrot's Mix nº4, sin tratar y tratada.....	142
<b>Figura 77.</b>	Cristalización de Parrot's Mix nº4, sin tratar y tratada.....	142

<b>Figura 78.</b>	Permeabilidad al vapor de agua de Parrot's Mix nº4, sin tratar y tratada.....	143
<b>Figura 79.</b>	Succión capilar de la Arenisca del Figaró sin tratar, antes y después de sales.....	145
<b>Figura 80.</b>	Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 4 caras, antes y después de sales.....	146
<b>Figura 81.</b>	Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 6 caras, antes y después de sales.....	146
<b>Figura 82.</b>	Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 4 caras, antes y después de sales.....	147
<b>Figura 83.</b>	Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 6 caras, antes y después de sales.....	147
<b>Figura 84.</b>	Desorción de la Arenisca del Figaró sin tratar, antes y después de sales.....	148
<b>Figura 85.</b>	Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 4 caras, antes y después de sales.....	148
<b>Figura 86.</b>	Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 6 caras, antes y después de sales.....	149
<b>Figura 87.</b>	Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 4 caras, antes y después de sales.....	149
<b>Figura 88.</b>	Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 6 caras, antes y después de sales.....	150
<b>Figura 89.</b>	Succión capilar de la Calcilitita del Lorito sin tratar, antes y después de sales.....	152
<b>Figura 90.</b>	Succión capilar de la Calcilitita del Lorito tratada con CAPI por 4 caras, antes y después de sales.....	152
<b>Figura 91.</b>	Succión capilar de la Calcilitita del Lorito tratada con CAPI por 6 caras, antes y después de sales.....	153
<b>Figura 92.</b>	Succión capilar de la Calcilitita del Lorito tratada con PPPI por 4 caras, antes y después de sales.....	153
<b>Figura 93.</b>	Succión capilar de la Calcilitita del Lorito tratada con PPPI por 6 caras, antes y después de sales.....	154
<b>Figura 94.</b>	Succión capilar de la Caliza de Hontoria sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	157
<b>Figura 95.</b>	Desorción de la Caliza de Hontoria sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	157
<b>Figura 96.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Durango sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	160
<b>Figura 97.</b>	Desorción de la Arenisca de Durango sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	160
<b>Figura 98.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Begoña sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	163
<b>Figura 99.</b>	Desorción de la Arenisca de Begoña sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	163
<b>Figura 100.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	166
<b>Figura 101.</b>	Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de hielo – deshielo.....	166
<b>Figura 102.</b>	Desorción de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de sales.....	167
<b>Figura 103.</b>	Desorción de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de hielo – deshielo.....	167

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Generalidades

Desde la más remota antigüedad, el hombre ha usado distintos tipos de rocas como material noble para perpetuar sus construcciones más notables dado su carácter más duradero que otros materiales construidos, por ejemplo la madera. Así, los vestigios más antiguos de los asentamientos humanos estables nos han llegado principalmente materializados en piedra, constituyendo una de las principales fuentes de conocimiento de nuestro pasado.

Estas rocas son un legado a preservar para las futuras generaciones, siendo nuestra responsabilidad mantenerlas en el mejor estado de conservación y proteger todo el legado cultural que representan.

Antes de iniciar cualquier tipo de intervención conservadora sobre estos materiales, se tendría que tener conocimiento de:

- Su naturaleza: Origen geológico (si es una roca sedimentaria -tipo arenisca silícea o calcárea, roca carbonatada, etc.-, si es metamórfica –mármol- o ígnea -granito) y su composición mineral: si hay presencia de minerales normalmente inertes en las condiciones naturales más comunes (como el cuarzo o feldespato potásico), o constituidos por sustancias reactivas (en general a ácidos) e incluso altamente solubles (como la calcita o dolomita), si hay arcillas (ya que hay algunas que pueden absorber agua e hincharse, dando un consiguiente aumento de volumen en toda la roca, como las esmectitas), y también es importante comprobar la existencia de minerales secundarios (como la sericita) ya que su presencia, a expensas de constituyentes primarios de la roca, confiere debilidad a ésta, tanto frente a la alteración como frente a esfuerzos de compresión.
- Su textura: ésta viene condicionada por las uniones espaciales entre los diferentes componentes que la forman.

Estos parámetros (naturaleza y textura) definen el tipo de porosidad de la roca, su abundancia y conectividad. Estos parámetros son muy importantes ya que condicionan la alterabilidad de la roca. Por ejemplo, a igualdad de composición química, una roca que tenga una porosidad elevada, pero de diámetro pequeño y mal comunicada, formada por conductos tortuosos, será más susceptible de alterarse y lo hará más rápidamente que otra roca que tenga un tipo de porosidad con canales bien comunicados y de diámetro similar, ya que retiene más el agua en su interior.

- Su petrofísica, propiedades de la roca que dan conocimiento, entre otras propiedades, de la movilidad del agua por su interior: ¿Con qué dinámica absorbe agua?, ¿Hasta cuánto puede absorber?, ¿Con qué velocidad pierde el agua que ha absorbido?, ¿Cuánto tiempo y qué condiciones climatológicas necesita para perder todo el agua acumulada?, etc.

- Su durabilidad: la resistencia de este material al envejecimiento por la acción de una serie de agentes alterológicos. Las rocas se alteran dependiendo de sus características petrográficas (composición mineralógica, textura y porosidad) y por la acción de agentes externos (agua, como principal agente, condiciones atmosféricas, contaminantes, sales solubles nocivas, etc.).

En nuestro contexto geográfico de clima mediterráneo, donde los cambios de temperatura no son muy elevados, pero en los que la humedad y pluviosidad son relativamente altas, las sales solubles disueltas en el agua son el principal agente de alteración. Estas sales provienen de los aerosoles marinos, de los contaminantes industriales y del tránsito rodado.

- También es importante conocer su puesta en obra, situación del edificio, ubicación en el mismo, así como el resto de materiales que han estado o están en contacto con las rocas a conservar para saber si su composición química ha podido o puede interactuar con ellas; por ejemplo, un mortero de Pórtland unido a rocas carbonatadas dolomíticas puede acelerar espectacularmente su proceso de alteración (Prada, J.L. 1995).

Cuando una roca, colocada en una edificación, se altera, se generan formas de alteración no deseadas, que van debilitándola, llegando incluso a hacerla “no apta” para la finalidad que se le había colocado en un determinado lugar. Además, en la mayoría de casos es casi imposible eliminar las sales del sistema poroso de las rocas, y muchas veces se han de tratar sin poder eliminar el agente alterológico externo.

Una vez conocido el material presente en la obra, se han de estudiar los agentes que están alterando, ensuciando, envejeciendo, incluso eliminando al material objeto de estudio, así como sus mecanismos de actuación, para eliminarlos o minimizar su actuación en beneficio de la conservación del material pétreo.

Por último, si se ha detectado que el material a conservar está sucio, descohesionado y que faltan fragmentos del mismo, se debería escoger el método de limpieza más idóneo en cada caso, así como los tratamientos conservativos y el material de reposición a utilizar.

Un proceso de limpieza respetuoso debe ser:

- Ante todo sin acción mecánica agresiva, para evitar el desgaste de la roca, y debe mantener invariables el volumen y la porosidad de la misma.

En el caso de una limpieza química, el producto utilizado debería cumplir los siguientes requisitos:

- Debe tener una actuación superficial, minimizando al máximo la entrada de agua y/o productos activos del propio limpiador al interior de la piedra.
- Debería impedir al máximo la disolución de las suciedades para evitar su transporte en forma de sales al interior de la piedra. Un buen limpiador debería reblandecer sin disolver las costras de suciedad y, en caso de disolución, evitar su permanencia como iones solubilizados por medio de un mecanismo de floculación, precipitación o gelificación.
- No debe agredir la piedra, por tanto su pH debe ser lo más cercano posible al de la misma para evitar así su solubilización.

- Al ser eliminado con chorro de agua a baja presión, debería aumentar su viscosidad para impedir que al diluirse deje libres los iones disueltos que tiene absorbidos en su seno, y conseguir así inmovilizarlos.

Es evidente que, con estos condicionantes, lo que no puede tener es una acción espectacular de limpieza, y que algunas suciedades precisarán de 2 a 3 aplicaciones para conseguir su total eliminación.

La eliminación de costras biogénicas sólo sería necesaria en los casos en que éstas estén reaccionando negativamente física o químicamente con el sustrato (como pueden ser los líquenes sobre sustratos ácidos en presencia de feldespatos, a los cuales altera y transforma en partículas de tamaño arcilla (Ascaso, C., Galvan, J., Rodríguez Pascual, C. 1976) (Wilson, M.J. 1995)). Muchas veces, estas costras no son dañinas, tan sólo hacen variar el cromatismo del conjunto por su mera presencia. Alguna de estas costras parece que son capaces de proteger el sustrato, impidiendo su degradación (Ariño, X., Ortega-Calvo, J.J., et. al. 1995b).

Para devolver la cohesión a una roca se utilizan productos que actúan dentro de la red porosa de la misma, llegando a alcanzar las zonas "sanas", que todavía conservan la cohesión inicial. Este proceso se conoce con el nombre de consolidación (Amoroso, G.G. 1977).

Si la roca que nos ocupa es susceptible de ser alterada por la movilidad del agua en su fase líquida, y va a estar expuesta a la intemperie, es imprescindible darle una protección, que consiste en aplicar superficialmente un producto capaz de formar una película protectora, que evite el contacto directo entre la piedra y los agentes contaminantes atmosféricos y el agua en su fase líquida (Amoroso, G.G. 1977).

Los requisitos básicos que debiera cumplir un buen tratamiento conservativo son los siguientes (Amoroso, G.G., Fassina, V. 1983) (Clifton, J.R., Godette, M. 1982):

- Regulación de la difusión de agua y vapor de agua a través del material pétreo.
- Tener un coeficiente de expansión térmica lo más similar al del material objeto de estudio.
- No modificar excesivamente las propiedades físicas y mecánicas de la roca.
- No modificar la apariencia de la roca, sobre todo en cuanto al color y al brillo de la misma.
- Buena y fácil penetración hacia el interior del material, donde se completará su mecanismo de reacción con los radicales químicos existentes en la piedra, impidiéndose así su desplazamiento hacia la superficie con la evaporación del disolvente (Weber, H. 1985).
- No debe concentrarse en la superficie formando una costra dura, pero al mismo tiempo debe endurecer la superficie protegiéndola contra la erosión exterior.
- No debe dar lugar a productos secundarios perjudiciales para la roca ni debe ser corrosivo.

- Su efecto protector debe permanecer el mayor tiempo posible.
- Debe ser económico, tanto en cuanto a material como a la labor de aplicación.

A estos requisitos básicos hay que añadir los siguientes (Rossi-Manaresi, R. 1981) (Weber, H. 1985):

- Posibilidad de aplicación tanto en condiciones húmedas como secas de la piedra o del entorno.
- El proceso de cristalización en el interior de los poros debe ser controlado, para evitar los esfuerzos internos del material ante la formación de grandes cristales.
- Las características protectoras del producto no deben variar substancialmente según sea la reacción entre la sustancia pétreo y él mismo, es decir, deben ser intrínsecas de éste.

Un tratamiento hidrorepelente consiste en cubrir, no tapar, la superficie del material con microfibras o películas que aumenten su ángulo de contacto con respecto al agua.

Las características que un producto hidrofugante debe proporcionar al material tratado son las siguientes:

- Baja permeabilidad al agua líquida.
- Buena permeabilidad al vapor de agua.
- No contener subproductos que con el tiempo puedan dañar al material.
- Ser estables a la acción de productos químicos activos.
- No modificar el aspecto externo de la roca, ni justo después de la aplicación ni con el paso del tiempo ante la acción de las radiaciones ultravioletas (De Witte , E., Florquin, S., Terfve, A. 1983).

Cuando ya se ha elegido el producto adecuado según las necesidades requeridas, es necesario establecer una correcta forma de aplicación (De Witte, E., et al. 1985). Sobre todo es importante tener en cuenta el tipo de superficie sobre el que se va a aplicar el producto, sus dimensiones y la profundidad de penetración que se desea alcanzar.

El tratamiento se puede aplicar por diferentes mecanismos (Lazzarini, L., Laurenzi-Tabasso, M. 1986).

Si el objeto a tratar es móvil:

- Inmersión de la piedra a presión atmosférica en la solución del producto
- Inmersión bajo vacío en la solución
- Absorción por succión capilar

Si se trata de un edificio u objeto inmóvil:

- Aplicación por brocha o cepillo
- Vaporización

Cada mecanismo condiciona la cantidad de producto absorbido por la roca.

Si hay zonas en que el substrato está muy deteriorado y se decide sustituirlo, se pueden dar dos opciones:

- Sustituirlo con el mismo tipo de material. Es imprescindible que el nuevo material tenga características petrológicas y petrofísicas muy similares a las de la roca de la obra, ya que si no es así, se pueden generar tensiones y reacciones que degeneren en alteraciones más importantes que las existentes hasta el momento. También se ha de conocer si a la roca inicialmente se le dio un acabado en cantera, para que se pueda repetirlo; no sólo un acabado de forma, sino también un acabado con productos generalmente de origen natural, como pueden ser aceites, ceras, fosfatos naturales de origen animal, colorantes naturales como pueden ser tierras, vegetales, entre otros que, además de homogeneizar el color de las rocas, son protectores y endurecedores naturales. Son técnicas que normalmente no quedan reflejadas en ningún informe, pero que son muy comunes entre los maestros de cantería. A veces, una vez colocada la roca en obra, parece que tiene una ligera pátina que nos podría hacer dudar de su procedencia, pero al indagar, nos podemos encontrar con la sorpresa de ver que es una pátina antrópica original.
- Si por el contrario se decide sustituir con piedra artificial, se pueden utilizar diversos tipos de morteros. Pero para no tener problemas posteriores, estos morteros deberían cumplir los siguientes requisitos:
  - Han de tener una buena penetración y afinidad con la roca con la que se va a unir.
  - Deben ser capaces de asimilar las posibles tensiones que se produzcan en la obra.
  - No deben generar tensiones en la obra ni durante ni después de su fraguado.
  - Su aplicación no debe comportar una erosión superficial del substrato sobre el que se va a colocar.
  - Deben tener una similar o mayor transpirabilidad que el substrato para impedir que se formen barreras de humedad.
  - Estéticamente, deben presentar una textura y permitir la labra lo más parecida a la roca natural; también deben permitir ser teñidos para asimilarse en cuanto a la coloración.

Actualmente, en las ciudades se ha puesto en boga la costumbre de usar las paredes como lugares de expresión de deseos, publicidad y reivindicaciones de todo tipo, siendo esto tan usual que se ha convertido en una auténtica pesadilla para empresas y colectivos que deben ver cómo el entorno ciudadano se degrada en su estética a causa de estos graffiti que en los últimos años han tomado un auge espectacular.

Para proteger los monumentos y las fachadas de este problema se han desarrollado los productos antigraffiti que impiden la penetración de las pinturas en la red porosa de la roca.

Finalmente, cabe señalar otros dos principios genéricos que deben ser respetados en una intervención: que los productos y técnicas no impidan o condicionen una intervención posterior; y que en el caso de aplicación de productos químicos, éstos no generen toxicidad a posteriori, en especial en entornos habitados o muy visitados, como por ejemplo ruinas y monumentos.

## 1.2 Objetivo

Cuando se ha de seleccionar un producto conservativo para tratar de devolver las propiedades perdidas a las rocas a restaurar, nos damos cuenta que las hojas técnicas de los mismos sólo hacen referencia a las características del producto.

Cabe remarcar que éste, una vez colocado sobre una roca, no se dispone a modo de película continua, sino que su zona de aplicación está formada por canales de diferente tamaño de radio, ramificados de diversas formas, con cuellos de botella que dificultan su paso hacia el interior, y muchas veces con zonas de diferente contenido de humedad.

Así pues, el producto no podrá polimerizar de igual forma en cada ubicación diferente, y presentará variaciones de comportamiento dependiendo de la cantidad de producto presente y de la cantidad de agua que se encuentre.

La bibliografía existente no recoge, ni puede hacer, un estudio exhaustivo para todos los tipos de rocas y para todos los productos comerciales existentes.

En este trabajo se pretende estudiar las características petrográficas y petrofísicas de seis tipos de roca natural y una de artificial, y su durabilidad frente a la acción mecánica de agentes externos en el interior de la red porosa de la roca (cristalización de sales y hielo-deshielo).

Posteriormente se determinará el tratamiento conservativo más adecuado para cada tipo de roca, y se valorará su eficacia una vez envejecida la roca tratada.

Las rocas se alteran por la acción de agentes agresivos (atmosféricos, contaminantes, sales solubles nocivas, etc.). El tratar una roca con productos conservativos, además de buscar devolver las propiedades perdidas a la roca, también tiene como objetivo hacer más duradera la roca frente a estos agentes.

En la normativa española actual se tiene en cuenta la acción agresiva que produce el agua sobre las rocas, en sus ciclos de hielo – deshielo, cristalización de sales, (normas UNE-EN 12371 y 12370). La importancia de la acción mecánica que se genera dentro de la red porosa de los materiales durante estos ciclos depende de la composición del material, y sobre todo del sistema poroso que posee. En este trabajo se estudiará el comportamiento de un tipo de roca, antes y después de ser tratada, frente al envejecimiento artificial acelerado de hielo - deshielo.

En nuestro contexto geográfico de clima mediterráneo, donde los cambios de temperatura no son muy elevados, las sales solubles son el principal agente de alteración. Estas sales provienen parcialmente de los aerosoles marinos. Si además se estudia el caso de murallas antiguas (por ejemplo la Muralla Romana de Tarragona) que contiene una argamasa rica en

yesos, o el de edificios reparados con cementos que aportan las sales solubles al sistema, la agresividad de las sales como agente alterológico aumenta.

Como que en la mayoría de casos es casi imposible eliminar las sales del sistema poroso de las rocas, y muchas veces se han de tratar con productos conservativos, es interesante estudiar en laboratorio la variación de las propiedades hídricas de las probetas tratadas tras ser sometidas al ensayo de envejecimiento artificial acelerado mediante cristalización de sales y así obtener datos referentes a la durabilidad del material pétreo y el producto conservativo una vez sometidos a este agente alterológico. Éste es otro de los objetivos de este trabajo.

La selección de los siete tipos de materiales estudiados atiende a varias razones:

- La arenisca del Figaró y el mortero sintético Parrot's Mix nº4 ya fueron estudiados en la tesis de licenciatura. En este trabajo se pretende observar la diferencia de comportamiento de estos materiales al aplicarles el tratamiento conservativo completo, es decir el consolidante y el hidrofugante a la vez. Además, también se pretende poner de manifiesto que los estudios realizados sobre probetas de roca tratadas por las seis caras no dan información fidedigna de lo que en la realidad sucede cuando se aplican tratamientos conservativos en una edificación.
- La selección de la calcilita de Lorito atiende a la experiencia adquirida por esta autora con esta roca, dada la investigación llevada a cabo en la Muralla de Tarragona, sector Portal de Sant Antoni, encargada por el Ayuntamiento de Tarragona.
- El estudio de las litologías denominadas Hontoria, Durango y Begoña, tratadas con los tratamientos conservativos aquí ensayados, fue encargado por el Ayuntamiento de Bilbao, con la finalidad de poseer una caracterización de los tres tipos de roca más utilizados en su provincia, y determinar cual es el mejor tratamiento conservativo para cada uno de ellos.
- Por último, se ha caracterizado una de las variedades de Arenisca de Montjuïc, que es el material con el que están realizados la mayoría de edificios construidos en piedra en Barcelona.

La elección de los productos conservativos para realizar este trabajo atiende a las siguientes razones:

- La empresa Industrial Química Parrot, S.A., actualmente Pinturas Parrot de AKZO NOBEL COATING, S.A., tiene una gama de productos específicos suficientemente amplio para abordar la compatibilidad de tratamientos con los diferentes tipos de roca (silícicas y carbonatadas).
- Los productos conservativos de la empresa Th. Goldsmicht, S.A., que se han aplicado sólo en la roca Arenisca de Montjuïc, son muy utilizados en las restauraciones de monumentos arquitectónicos de Barcelona, y son productos básicos, a partir de los cuales muchas empresas químicas formulan sus nuevos productos.

La cantidad de tratamiento que penetra dentro de la red porosa de la roca, así como la profundidad a la que éste llega depende de las características de la roca y del producto. Pero no se ha de olvidar que la forma de aplicar el producto es otro factor que condiciona la profundidad de penetración y la cantidad de producto penetrado.

En el trabajo de licenciatura de esta autora se trató las probetas de dos tipos de materiales por las 6 caras, dando como resultado una variación importante de las propiedades petrofísicas de los materiales tratados con los productos conservativos respecto a los mismos sin tratar, y una casi nula alteración del material tratado tras ser sometido al ensayo de envejecimiento artificial acelerado por cristalización de sales.

Después de la experiencia adquirida (como demostrarán los resultados obtenidos para las litologías Figaró y Lorito tratadas por 6 y 4 caras) (Navarro Ezquerro, A., García Pascua, N., et al. 1995), de la bibliografía consultada (Rossi-Doria, P., Tabasso, M. 1971) (Marschner, H. 1978) y de la observación de cómo se aplican los tratamientos en obras reales, se ha decidido tratar las probetas del resto de tipos de rocas por 4 caras, paralelas dos a dos, con pincel y hasta saturación.

Se ha de tener en cuenta que la recomendación V.1b de la RILEM (1980) (Réunion internationale de laboratoires d'essais et matériaux) sobre la cristalización de sales con sulfato sódico para probetas tratadas prescribe el tratamiento de éstas por cuatro caras, paralelas dos a dos.

Se ha decidido realizar el estudio con productos de carácter consolidante y con productos de carácter hidrofugante, pero aplicados el segundo sobre el primero. Así pues, no se realizará el estudio por separado de cada tipo de producto, sino que se pretende obtener resultados de la pareja de productos, con la finalidad de que éstos puedan ser utilizados en el campo de la rehabilitación de edificios, ya que es la forma habitual de aplicación.

Por último, se ha pretendido realizar la caracterización de los materiales y determinar la bondad de los productos aplicados mediante ensayos sencillos de laboratorio, y se ha intentado deducir el funcionamiento petrofísico sin realizar ensayos más específicos.

De esta forma se pretende definir un método analítico sencillo, poco costoso, y de fácil lectura para los profesionales del ámbito de la construcción, expertos en caracterización del hormigón.

### **1.3 Antecedentes**

Ya desde la antigüedad se han ido aplicando una serie de productos naturales con la finalidad de consolidar las rocas que habían perdido su cohesión; se usaban tratamientos con aceite de lino, resinas naturales, lechadas de cal, silicatos alcalinos, etc. (Mora, L. 1981). La protección exterior se llevaba a cabo usando ceras, parafinas, agua de cal con caseína y muchos otros métodos de los que en la actualidad quedan pequeños vestigios cuando se estudia detenidamente todo el proceso de conservación de una roca (Baer, N. et al, 1982).

El efecto conservativo de estos productos no duraba demasiado y, a veces, no conseguían el objetivo deseado. Por eso, a lo largo de la historia, se han ido diseñando diferentes productos con la finalidad que cumplieran mejor sus cualidades y duraran más (Cabrera, J.M. 1966).

A principios del siglo XIX ya se tienen noticias de que se buscaban productos conservativos económicos dado que el coste de sustituir piedras originales deterioradas era elevado y el proceso era cada vez más difícil por la magnitud de los edificios construidos (Domaslowski, W. et al. 1982).

La observación de la idoneidad de un determinado producto se realizaba "in situ", viendo cómo evolucionaba en el propio monumento, en detrimento de la roca. Muchas veces la roca tenía patologías no detectadas y, por tanto, no solucionadas antes de aplicar el tratamiento, comportando problemas importantes una vez finalizados los trabajos conservativos.

Actualmente, se tiende a seleccionar los productos conservativos haciendo ensayos en el laboratorio. Se ha de tener en cuenta que si un producto funciona bien para un tipo de piedra, no quiere decir que ese producto sea el mejor del mercado para tratar cualquier otro tipo de roca (De Castro, E. 1982).

Los productos más utilizados a lo largo de la historia son los siguientes (García Pascua, N. 1993):

### CONSOLIDANTES INORGÁNICOS

- Hidróxido de calcio. En solución, reacciona con el ácido carbónico de la atmósfera para precipitar calcita (carbonato cálcico).
- Hidróxido de bario. También reacciona con el ácido carbónico atmosférico para precipitar baritina (sulfato de bario). En 1862, A.H. Church presentó una patente para utilizar este hidróxido de bario como preservador de la piedra de naturaleza calcárea (Lewin, S.Z. 1988).
- Hidróxido de estroncio. Reacciona de la misma manera que en los dos casos anteriores, pero el precipitado que da (carbonato de estroncio) es más soluble y por ello menos empleado (Amoroso, G.G., Fassina, V., 1983).
- Aluminato de potasio. Por hidrólisis da alúmina (óxido de aluminio) que se adhiere a la roca por enlaces secundarios de tipo electrostáticos (Amoroso, G.G., Fassina, V., 1983).
- Silicatos alcalinos. Por hidrólisis generan sílice que, en medio acuoso, se transforma en ácido silícico. Éste se condensa en forma de gel de sílice hidratada (Domaslowski, W., Lukaszewics, J.W., 1988). Durante este proceso, se liberan los iones alcalinos.
- Fluorsilicatos. El ácido fluorsilícico reacciona con los carbonatos, óxidos e hidróxidos para formar sales neutras metálicas de sodio, potasio, aluminio, magnesio, etc. Las sales no alcalinas pueden reaccionar con los carbonatos formando un gel de sílice y un gel de la sal correspondiente con propiedades consolidantes. Los resultados de la aplicación de estos productos no han sido todavía muy comprobados a largo plazo (Fratini, F., et al. 1989).
- Otros menos utilizados: estearatos de cinc y aluminio, sulfatos de aluminio, ácido fosfórico y fosfatos.

CONSOLIDANTES ORGÁNICOS. Estos productos se pueden introducir en la red porosa de la roca por dos mecanismos: o bien son polímeros disueltos en un disolvente que, al evaporarse éste, empiezan a polimerizar, o bien se aplican directamente monómeros que polimerizan dentro del capilar de la roca (De Witte, E., Huget, P., Van den Broeck, P. 1977).

- Resinas termoplásticas (Torraca, G. 1981). Son sólidos moleculares de gran longitud, que se sintetizan por polimerización de monómeros. Estas largas cadenas son flexibles a temperaturas moderadas, pero por debajo de una temperatura dada se endurecen y pierden su flexibilidad.
- Resinas vinílicas. Se utilizan como protectores, adhesivos y consolidantes.
  - Poliacetato de vinilo (PVAC). Su aplicación comporta la formación de películas incoloras, altamente transparentes, resistentes a la luz del sol y a la radiación ultravioleta. Incrementan la resistencia al esfuerzo por compresión y el valor del módulo de elasticidad de las muestras.
  - Alcohol polivinílico (PVAL). Su aplicación comporta la formación de películas duras e incoloras y estables a la luz. Incrementan las propiedades mecánicas de las muestras tratadas.
- Resinas acrílicas. Se utilizan como protectores y consolidantes. Tienen una baja penetración, y por eso a veces se usan mezclas de siliconato y copolímeros acrílicos (Amoroso, G.G., Fassina, V. 1983).
- Resinas termoendurecidas. Están formadas por largas cadenas que, por acción del calor y de reacciones químicas, están totalmente cruzadas y entrelazadas, formando en conjunto una masa dura, frágil y quebradiza. No son flexibles y no se deforman bajo la acción del calor. A veces, para reforzar su estructura se les añade fibra de vidrio (Cavaletti, R., Lazzarini, L. et al. 1985).
  - Resinas de poliésteres. En conservación sólo se utiliza el poliéster no saturado. Después de endurecer, su aplicación es irreversible y adquiere una estructura reticular (Amoroso, G.G., Fassina, V. 1983). Todas estas resinas son resistentes a la acción de ácidos y bases, pero la mayoría de ellas amarillean al ser expuestas a la luz. Después de endurecer poseen una buena resistencia mecánica a compresión y flexión, y baja resistencia a la tensión.
  - Resinas epoxi. Después de endurecer, son irreversibles, resisten la acción de ácidos y bases fuertes o débiles, pero son muy vulnerables a la luz, principalmente a la ultravioleta. Son resistentes a las variaciones de temperatura y mejoran considerablemente las propiedades mecánicas a compresión y a flexo-tracción, aunque son poco elásticas (Alessandrini, G., Peruzzi, R. et al 1978).
- Poliuretanos. Pueden ser termoplásticos o termoendurecidos, dependiendo de su síntesis, pero en general presentan una buena resistencia al ataque químico e incrementan los valores de las resistencias mecánicas del material sobre el que se aplican.
- Ceras naturales y sintéticas. Son productos consolidantes e hidrofugantes a la vez, aunque este último carácter disminuye con el paso del tiempo. Todas ellas oscurecen la superficie tratada y penetran muy poco.

- Las ceras naturales se adhieren poco al soporte, volviéndose, con el tiempo, pegajosas, recogiendo gran cantidad de polvo. Actualmente se utilizan ceras derivadas del petróleo, flexibles a bajas temperaturas, más adherentes y con propiedades impermeabilizantes.
- Las ceras sintéticas más utilizadas en conservación son las de polietilenglicol. Son solubles en agua y disolventes orgánicos. Son más estables al calor y al ataque químico que las ceras naturales.
- Compuestos orgánicos derivados del silicio.
  - Silicatos orgánicos. Tienen carácter consolidante. El más utilizado es el silicato de etilo. No se alteran por la acción de la luz y mejoran las propiedades mecánicas del material tratado.
  - Compuestos organosilícicos. Cuando se tienen compuestos formados a partir de la unión de átomos de silicio e hidrógeno se denominan silanos. Estos hidrógenos pueden ser reemplazados por grupos alquilo, como metil o etil. Cuando el sustituyente es un grupo alcoxi, el compuesto que se forma es el éster silícico. Pero se puede llegar a producir una sustitución mixta, dando lugar a los alcoxilquilsilanos. Las moléculas de estos compuestos pueden reaccionar entre sí, formando cadenas polimerizadas de carácter lineal, dando lugar a las gomas de silicona. Si las estructuras son reticulares se denominan siloxanos, de peso molecular bajo, y si la polimerización continúa hasta formar productos mayores se forman las siliconas (Price, C.A. 1981), de peso molecular mayor. En general, tienen propiedades consolidantes e hidrofugantes.

La aplicación de estos ésteres silícicos en la conservación de la piedra está basada en la reactividad de los grupos alcoxi con los grupos hidroxílicos de la superficie del material. Si los granos minerales del material a tratar no presentan grupos hidroxílicos reactivos en su superficie, los grupos alcoxi reaccionarán con las moléculas del agua, formándose ácido silícico que llenará el espacio intergranular reduciéndose la porosidad pero no endureciendo el material al no enlazar granos. Por esto, este tipo de productos no es igual de eficaz para todo tipo de material (Grison, C.A., Weiss, N.R. 1981).

Se aplican sobre la piedra en forma de monómeros de bajo peso molecular y baja viscosidad, características que favorecen la penetración en la red porosa de la roca. Es importante que la humedad del interior de la roca sea baja para que no se empiece a producir una hidrólisis rápida, que comportaría una fracturación del producto.

Las reacciones de hidrólisis y condensación dan paso a la formación de siloxanos; cuando la condensación aumenta estos siloxanos forman los polímeros llamados polisiloxanos o siliconas, siendo capaces de actuar como adhesivos, consolidantes e incluso hidrofugantes, en función del mecanismo que se produzca.

## PROTECTORES HIDROFÓBICOS

Estos productos pueden evitar, o al menos reducir, la penetración de agua, de soluciones salinas o ácidas y contaminantes gaseosos, así como reducir la adhesión de polvo y partículas contaminantes procedentes de la atmósfera.

Estos productos se dividen en dos grupos:

### PRODUCTOS ORGÁNICOS NATURALES:

- Grasas, aceites, ceras, parafinas y jabones

### PRODUCTOS SINTÉTICOS:

- Resinas acrílicas. Tienen características consolidantes e hidrofugantes. Forman una película hidrorepelente sobre la superficie del material tratado, de tal forma que sólo el vapor de agua puede penetrar a través de ella, disminuyendo por tanto la acción destructora del hielo y de la cristalización de sales (Kotlik, P., Zelinger, J. 1978). Cabe destacar que esta propiedad desaparece con el tiempo (Alcalde, M., Villegas, R., et. al. 1990).
- Acetato de polivinilo. También tiene carácter consolidante e hidrofugante a la vez. Incluso se ha llegado a utilizar para reconstruir elementos dañados (Bilinski, R.J., Pankala, B. 1978).
- Perfluorpoliéteres. Tienen carácter hidrófugo. Son muy estables a la luz, al calor y al ataque químico; son permeables a los gases, transparentes e insolubles en agua.
- Siliconas. Los radicales presentes en su estructura molecular pueden conferirles características hidrófugas (grupos metil) o consolidantes (grupos fenil). Su efecto hidrofugante es temporal, ya que reacciona con el oxígeno y se deteriora por la acción de la luz (Biscontin, G., Botteghi, C., et. al. 1987).
- Siliconatos. Los más utilizados son los metilsiliconatos de sodio y potasio, aunque la primera genera manchas blancas de carbonato de sodio (Alcalde, M., Villegas, R., et. al. 1990).

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Caracterización petrográfica

Para realizar una caracterización petrográfica se precisa la obtención de láminas delgadas de cada tipo de material, de entre 20 y 30  $\mu\text{m}$  de grosor, unidas a un portaobjetos. La observación se realiza mediante un microscopio óptico petrográfico provisto de luz polarizada y analizador.

De los seis tipos de rocas naturales estudiados, dos son rocas carbonatadas y cuatro son areniscas.

Para clasificar las rocas carbonatadas se ha utilizado las clasificaciones de Dunhan (1962), que atiende a la textura de la roca, y la de Folk (1962), que atiende al tamaño de grano y a su composición.

Para clasificar las areniscas se ha utilizado la clasificación de Pettijohn (1957), que atiende a criterios de composición de granos y proporción de la matriz detrítica.

En el caso de la piedra artificial (mortero sintético) ha sido necesario realizar una observación del material con un detalle mayor al que proporciona la resolución óptica del microscopio petrográfico. Así pues se ha utilizado el microscopio electrónico de barrido; para ello, la muestra se ha de cubrir con un producto conductor (oro o carbón), y se une a un portaobjetos igualmente conductor.

Para determinar el color de los distintos tipos de piedra y del mortero sintético se utiliza la carta de color Rock Color Chart, basada en el sistema colorimétrico Munsell. En este sistema, un color viene determinado por tres atributos del color:

- Hue: Notación del color registrado por el ojo como relación de la longitud de onda de la luz que éste alcanza.

El sistema Munsell se basa en 5 hues principales (rojo (R), amarillo (Y), verde (G), azul (B) y morado (P)) y 5 hues intermedios, referidos a mezclas de igual cantidad de cada hue principal (amarillo - rojo (YR), verde - amarillo (GY), azul - verde (BG), morado - azul (PB) y rojo - morado (RP)).

Cada uno de los 10 hues se divide en cuatro segmentos con igual paso visual (0, 2.5, 5 y 10), indicando cada uno mayor profundidad de color.

Por ejemplo, el color amarillo pálido (pale yellow) se representa por 2,5Y.

- Value: Indica el grado de luminosidad de un color con relación a una escala de gris neutro (acromática), que se extiende desde el negro puro (1/) hasta el blanco puro (10/).
- Chroma: Indica el grado de saturación de un color. Físicamente es el grado de dilución de un color cualquiera por un gris neutro del mismo valor. El valor mínimo de la saturación de un hue cualquiera es (/0), siendo (/14) el valor que se utiliza para un color con un máximo de saturación.

## 2.2 Caracterización petrofísica y envejecimiento artificial acelerado

Posteriormente se caracteriza el material objeto de estudio petrofísicamente y se realiza un envejecimiento artificial acelerado.

### 2.2.1 Caracterización petrofísica

Para caracterizar petrofísicamente las rocas estudiadas se han realizado una serie de ensayos normalizados que permiten observar fundamentalmente el comportamiento de las rocas frente al agua. Los ensayos llevados a cabo y los parámetros que se han calculado son los siguientes:

#### 2.2.1.1 Absorción al vacío

Basado en las Recomendaciones I.1 y I.2 de la RILEM (1980), teniendo en cuenta las modificaciones realizadas por Alonso, J. (1986).

En este ensayo las probetas absorben, en condiciones de vacío, la máxima cantidad posible de agua.

El procedimiento experimental es el siguiente (Navarro Ezquerro, A. 1993):

- Deseccación de la muestras en estufa a 60°C hasta alcanzar masa constante entre dos pesadas separadas entre sí 24 horas.
- Colocación de las mismas en un recipiente conectado a una bomba de vacío, con una presión parcial de vacío de 0.5 mbar.
- Llenado del recipiente con agua destilada por el procedimiento de "gota a gota", controlando de modo que al cabo de 1 hora las probetas estén totalmente cubiertas (sin perder la presión parcial de vacío).
- Absorción de agua bajo vacío durante un periodo de tiempo proporcional a la presión obtenida (4 horas a una presión parcial de vacío de 0,001mbar).

Con los valores obtenidos se calculan una serie de parámetros:

- Contenido total de agua absorbida.  $W_s$  (%)

$$W_s = \frac{M_s - M_o}{M_o} \cdot 100$$

$M_s$ : masa total de la probeta saturada en vacío

$M_o$ : masa inicial en seco de la probeta

- Porosidad accesible.  $n^\circ$  (%)

$$n^{\circ} = \frac{Ms - Mo}{Ms - Mh}$$

Mh: masa hidrostática

### 2.2.1.2 Succión capilar

Basado en la Recomendación II.6 de la RILEM (1980) y la norma 11/85 del CNR-ICR (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto Centrale del Ristauro).

Este ensayo consiste en observar la velocidad con la que las probetas absorben agua por el mecanismo de succión capilar. Las probetas absorben el agua sólo por una de sus caras.

El ensayo se desarrolla con las características siguientes (Navarro Ezquerra, A. 1993):

- Secado de las probetas en estufa a 60°C hasta masa constante. Enfriamiento durante 4 horas en un desecador a temperatura ambiente.
- El pesaje de las muestras se realiza en intervalos marcados por números cuadrados.
- La temperatura ambiental es de 21±5°C y la humedad ambiental es de 46±10%.

A partir de los valores registrados se determina el siguiente parámetro:

- Coeficiente de absorción capilar. c.A.C.(Kg/(m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>)). Este parámetro indica la velocidad con la que las probetas absorben agua.

$$c.A.C. = \frac{Ma}{\sqrt{Ta}}$$

Ma: valor del incremento de masa por unidad de superficie

√Ta: valor del tiempo transcurrido para obtener el incremento de masa por unidad de superficie

### 2.2.1.3 Desorción

Basado en la norma F1 86/52 del CNR-ICR, teniendo en cuenta las modificaciones realizadas por Alonso, J. (1986).

Para este ensayo se utilizan las mismas probetas procedentes del ensayo de absorción al vacío, es decir completamente saturadas de agua.

En este ensayo se observa la dinámica de la pérdida de agua por parte de las probetas, y se fija el grado de saturación final.

Para realizar el ensayo, se colocan las probetas en una cámara climática, a una temperatura constante de 25±5°C y una humedad de 80±5%.

Se calcula la pérdida de peso que experimentan las probetas en tiempos proporcionales, hasta alcanzar masa constante.

El parámetro que se calcula es el siguiente:

- Grado de saturación final respecto al máximo contenido de agua absorbida.  $S_D$  FINAL (%).

$$S_D FINAL = \frac{M_e - M_o}{M_s - M_o} \cdot 100$$

Me: masa final de la probeta

Mo: masa en seco de la probeta

Ms: masa saturada de la probeta

#### 2.2.1.4 Absorción libre

Según la norma 7/81 del CNR-ICR.

Las probetas no llegan a alcanzar un grado de saturación tan elevado como en la absorción al vacío, ya que el ensayo se realiza en condiciones ambientales. La posibilidad de hacer medidas continuas permite observar el ritmo de la velocidad de saturación.

Las probetas se mantienen sumergidas en agua durante todo el tiempo que dura el ensayo, hasta alcanzar masa constante. Las principales diferencias con la absorción al vacío son que se realizan más medidas (en absorción al vacío sólo se hace una medición inicial y otra medición final) y que el ensayo se realiza en condiciones ambientales.

El parámetro que se calcula es:

- Grado de saturación final.  $S_A$  FINAL (%).

$$S_A FINAL = \frac{W_e}{W_s} \cdot 100$$

Ws: contenido de agua obtenido en condiciones de vacío

We: contenido máximo de agua alcanzado

#### 2.2.1.5 Permeabilidad al vapor de agua

Según la norma 21/85 del CNR-ICR).

Este ensayo consiste en observar la velocidad con la que el vapor de agua atraviesa las probetas por el mecanismo de difusividad.

El ensayo se desarrolla con las características siguientes:

- Secado de las probetas en estufa a 60°C hasta masa constante. Enfriamiento durante 4 horas en un desecador a temperatura ambiente.
- Colocación de las probetas en permeámetros que contienen una cantidad concreta de agua, atrapada en un material hidrófilo para evitar salpicaduras de agua sobre la piedra.

- Seguidamente colocación de los permeámetros en una cámara climática con una temperatura constante de 20°C y una humedad constante del 40%.
- Los permeámetros se van pesando a intervalos regulares de tiempo hasta alcanzar el régimen estacionario, es decir, cuando la variación de peso registrada entre dos medidas sucesivas difiere menos del 5%.

A partir de los valores registrados se determina el siguiente parámetro:

- Coeficiente de permeabilidad  $Kv'$  ( $g/(m^2 24h)cm$ ), corregido el espesor y referenciado a la temperatura ensayada.

$$Kv'(20^\circ C) = Kv(20^\circ C) \times e$$

$$\text{Donde } Kv(20^\circ C) = Kv(25^\circ C) \times \frac{P(20^\circ C)}{P(25^\circ C)}$$

$$Kv(25^\circ C) = \frac{-[mi - m(i-1)]}{S \times [ti - t(i-1)]}$$

e: espesor de la probeta

P: presión parcial

mi: masa de la muestra y el permeámetro en cada intervalo de tiempo "i"

S: superficie de la muestra

ti: valor del tiempo transcurrido en cada medida

## 2.2.2 Envejecimiento artificial acelerado

### 2.2.2.1 Cristalización de sales

La alteración que presentan estas rocas frente al ataque de sales solubles se ha estudiado realizando el ensayo de envejecimiento artificial acelerado mediante la cristalización de sales con sulfato sódico decahidratado, según la norma UNE-EN 12370.

Se ha escogido esta sal como agente alterológico por ser una de las más agresivas para la roca (Iñiguez Herrero, J. 1961), (Price, C.A. 1978), (Arnold, A., Kueng, A. 1985).

La roca se somete a ciclos de inmersión en una solución de sulfato sódico decahidratado y posterior secado en estufa a 60°C. Durante el proceso de inmersión la sal penetra en la red porosa de la roca. Cuando se seca la probeta, la sal se deshidrata. Al volver a sumergir la probeta en la disolución, la sal presente en los poros de la roca se hidrata de nuevo y aumenta de volumen. De este modo se generan tensiones que llegan a romper los poros en los que se encuentra la sal, aumentando la porosidad de la roca, y se produce una progresiva pérdida de masa (Niesel, K. 1978).

La marcha de un ciclo es la siguiente (Navarro Ezquerra, A. 1993):

- Secado de las probetas en estufa a 60°C hasta obtener masa constante.
- Enfriamiento de las probetas en un desecador, a temperatura y humedad constante, durante 6 horas.
- Inmersión de las probetas, durante 3 horas, en una disolución de sulfato sódico decahidratado al 14%. Se utilizan 5 volúmenes de disolución por volumen de muestra. La disolución ha de estar a 20±2°C.
- Secado de las probetas, durante 15 horas, en estufa a 60°C.

Antes de volver a sumergir las probetas en la disolución, se han de pesar y anotar cualquier tipo de alteración que hayan sufrido. Se han pintado las aristas con tinta indeleble y se han fotografiado las probetas antes y después de totalizar el ensayo para poder comparar visualmente la degradación que han sufrido.

Cada ensayo consta de 12 ciclos de 24 horas, a no ser que la roca se desmorone antes. Los días en que no se puede realizar un ciclo, las probetas permanecen en estufa; secándose más de lo habitual; este hecho queda reflejado en las gráficas de variación de masa respecto al tiempo.

Al finalizar el ensayo, se lavan las probetas con agua destilada, se secan y se pesan, para así obtener la pérdida de masa que han sufrido.

El parámetro que se calcula es el siguiente:

- Pérdida de masa.  $\nabla M(\%)$

$$\nabla M = \frac{M_i - M_o}{M_o} \cdot 100$$

Mi: masa final, tras lavar la probeta y secarla

Mo: masa inicial en seco

### 2.2.2.2 Hielo /deshielo

La alteración que presentan estas rocas frente a la acción del hielo /deshielo se ha estudiado siguiendo la norma UNE-EN 12371.

La roca se sumerge en agua durante 48 horas para conseguir saturarla. Posteriormente se somete a 25 ciclos de hielo y deshielo, de modo que cada ciclo comprende una permanencia de 20 horas a temperatura de -15°C y 4 horas en agua a temperatura de 15 a 20°C. Finalizado el último ciclo se desecan las probetas, hasta peso constante, determinándose el peso seco final.

El parámetro que se calcula es el siguiente:

- Módulo de resistencia a las heladas H (%).

$$H = \frac{M_o - M_i}{M_o} \cdot 100$$

Mi: masa final, tras secar la probeta

Mo: masa inicial en seco

### **2.3 Modificación de las propiedades petrofísicas y de la variación porcentual de masa tras el envejecimiento artificial acelerado del material tratado**

Para determinar la bondad de los productos de tratamiento conservativo, se tratan las probetas de los 7 tipos de materiales objeto de estudio con dichos productos y se les realiza el estudio petrofísico y el envejecimiento artificial acelerado seleccionado.

Las modificaciones de las propiedades petrofísicas de los materiales estudiados, antes y después de ser tratados, indican la eficacia de cada tipo de tratamiento.

### **2.4 Modificación de algunas propiedades petrofísicas tras el envejecimiento artificial acelerado**

Para valorar las modificaciones petrofísicas que ha generado el envejecimiento artificial acelerado, se vuelve a realizar algunos de los ensayos utilizados para la caracterización petrofísica de las probetas sin tratar y tratadas, una vez ya envejecidas.

De esta forma se puede determinar si los tratamientos conservativos son capaces de resistir el ataque del agente alterológico seleccionado y si son capaces de proteger a las rocas.

### 3 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA

La caracterización petrográfica se ha realizado a diferentes escalas, desde la más macroscópica (a visu), pasando por la lupa binocular, hasta la microscopía óptica petrográfica.

El mortero sintético se ha estudiado también mediante el microscopio electrónico de barrido.

#### 3.1 Caracterización petrográfica de la Arenisca del Figaró

A "visu" se observa que esta arenisca es de grano fino, homométrica en cuanto a su tamaño de grano, de color marrón rojizo (reddish brown, 2,5YR 5/3 de la Munsell Soil Color Chart), con niveles milimétricos o inferiores de una tonalidad marrón rojiza oscura (dark reddish brown, 2,5YR 3/3) correspondientes a una laminación cruzada (ver foto 1).

A lupa binocular se distinguen bien los granos de cuarzo, feldespato potásico (ortosa), fragmentos de roca (principalmente metamórficas), micas y turmalinas.

Su composición mineralógica porcentual es la siguiente (Gómez-Gras, D.M. 1992): Cuarzo (48,5%), feldespato potásico - ortosa - (11,2%), fragmentos de roca (8,3%), micas - biotita y moscovita - (1,3%), minerales accesorios (0,7%), plagioclasa (0,3%), y óxidos de hierro (0,2%).

La matriz es siliciclástica (4,1%) y filosilicatada (2,8%).

Se observan diferentes clases de cemento: Cemento de cuarzo (6%), ferruginoso (5,8%), carbonatado (5,2%), de baritina (2,9%), de feldespato potásico (1,8%), de kaolinita (0,8%) y cemento de illita (0,1%) (ver foto 2).

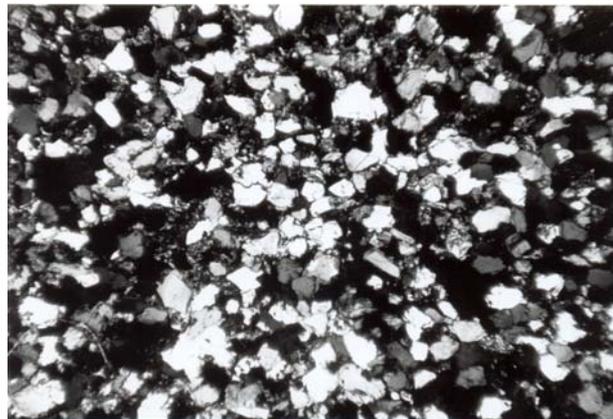
Su porosidad es moderada y de tipo interparticular.

Según la clasificación de Pettijohn (1957) se trata de una arcosa.

Roca de edad triásica, en concreto del triásico inferior en facies germánicas de tipo Buntsandstein de la zona del Figaró (Barcelona).



**Foto 1.** Observación "a visu" de la Arenisca del Figaró.



**Foto 2.** Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Arenisca del Figaró.

### 3.2 Caracterización petrográfica de la Calcilutita del Lorito

Es una roca de grano muy fino y homogéneo, de color amarillo pálido (pale yellow, entre 2,5Y 8/4 y 2,5Y 7/4) (ver foto 3).

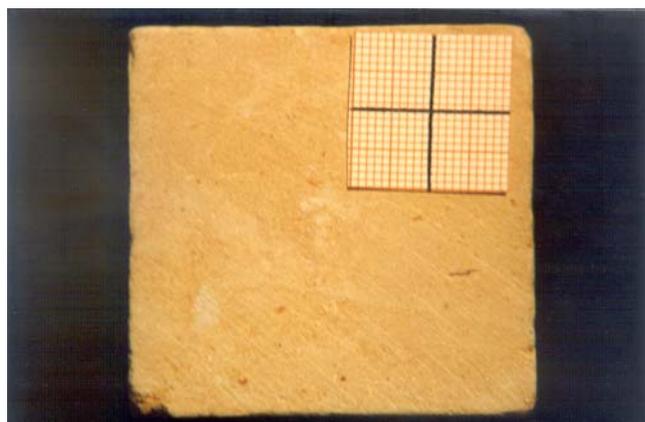
A microscopio óptico petrográfico se diferencian cristales de calcita (>60%), cuarzo (10-20%), dolomita (<20%) parcialmente dedolomitizada, minerales de arcilla - illita, caolinita, paligorskita - (< 1%), y óxidos de hierro (< 1%). Hay presencia de bioclastos (<2%) como bivalvos, equinodermos y foraminíferos. Las partículas de mayor tamaño no exceden de 0,0625 mm.

El cemento es carbonatado (ver foto 4 ).

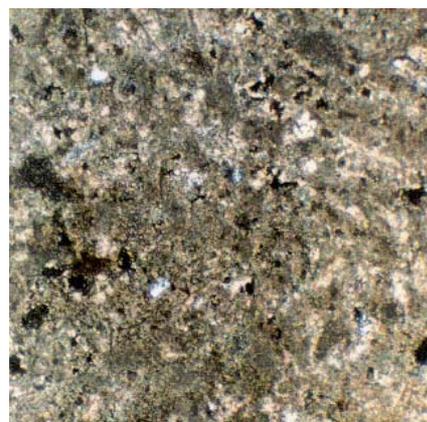
Su porosidad es elevada pero de pequeño diámetro, y es interparticular, aunque también hay una pequeña proporción de porosidad semicerrada en el interior de los cristales de dolomita que se están alterando (Prada, J.L. 1995).

Según la clasificación de Folk (1962) se trata de una calcilutita, y según la clasificación de Dunhan (1962) se trata de un mudstone.

Roca de edad miocénica, en concreto del Serravaliense inferior de la zona de Tarragona (Prada, J.L. 1995).



**Foto 3.** Observación "a visu" de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 4.** Observación a microscopio óptico con nicoles paralelos de la Calcilutita del Lorito.

### 3.3 Caracterización petrográfica de la Caliza de Hontoria

A escala de muestra de mano se observa que esta caliza está constituida principalmente por componentes fosilíferos. También se observa un moteado rojizo, disperso, relacionado con la presencia de óxidos de hierro y pequeños núcleos recristalizados (geodas). Es de color blancuzco (pale orange 10YR 9/2).

Cabe señalar que ya a escala macroscópica se pueden observar la existencia de porosidad de gran tamaño (ver foto 5).

La observación a lupa binocular ya permite diferenciar el contenido fosilífero: los componentes principales son las algas coralinas.

La microscopía óptica petrográfica permite diferenciar el contenido fosilífero (algas y algún briozoo), así como los componentes minoritarios como son los cristales de cuarzo y los óxidos de hierro.

El cemento es carbonatado, principalmente tipo micrita (cristales de tamaño inferior a  $4\ \mu\text{m}$ ). También se aprecia otro cemento de mayor tamaño (microesparita, de cristales entre  $4$  y  $10\ \mu\text{m}$ ), formado posteriormente. Estos dos tipos de cemento son postsedimentarios, y subaéreos (ver foto 6).

La porosidad macroscópica es muy elevada. Los estudios de Esbert, R.M. y Díaz-Pache, F. (1993) indican que se trata de una roca porosa, con una comunicación entre poros relativamente buena, que la porosidad atrapada no supera el 50%, y que el radio medio de acceso de poro es relativamente elevado (alrededor de las  $2\ \mu\text{m}$ ), y que la macroporosidad representa una tercera parte del volumen poroso intraparticular.

Según la clasificación de Folk (1962) se trata de una biomicrita, y según la clasificación de Dunhan (1962) esta roca es un boundstone, formada por un crecimiento de componentes orgánicos (algas).

Roca de edad cretácica, concretamente del Turonense, en la zona de Burgos (Marcos, R.M.; Esbert, R.M.; et. al., 1993).

Esta roca ha sido muy utilizada como material de construcción en la mitad septentrional de la Península; las construcciones más singulares son las Catedrales de Burgos y León, entre otros monumentos de Castilla, León, Madrid, País Vasco y Asturias.



**Foto 5.** Observación “a visu” de la Caliza de Hontoria.



**Foto 6.** Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Caliza de Hontoria.

### 3.4 Caracterización petrográfica de la Arenisca de Durango

Se trata de una arenisca de tamaño de grano fino y laminación subhorizontal paralela, de color gris marronoso (entre medium light gray, N6, y light brownish gray, 5YR 6/1) (ver foto 7). Cabe destacar que a "visu" ya se aprecian las micas tipo moscovita, que se disponen paralelas a la laminación.

La observación a microscopio óptico petrográfico permite identificar granos de cuarzo bien clasificados y subangulosos, y mica (moscovita). También se observan granos de plagioclasa y nódulos de arcillas.

La matriz es filosilicatada.

El cemento es de tamaño micrita y composición silícea.

Tiene poca porosidad, y ésta es interparticular (ver foto 8).

Según la clasificación de Pettijohn (1957) es una arcosa.

Roca de edad cretácica, concretamente del Santoniense.



**Foto 7.** Observación "a visu" de la Arenisca de Durango.



**Foto 8.** Observación a microscopio óptico con nícoles paralelos de la Arenisca de Durango.

### 3.5 Caracterización petrográfica de la Arenisca de Begoña

Es una arenisca de grano fino y laminación planar paralela, de color marrón grisáceo (entre grayish orange, 10YR 7/4, y pale yellowish brown, 10YR 6/2) (ver foto 9).

A escala microscópica (observación realizada con microscopio óptico petrográfico) se distinguen granos idiomorfos de cuarzo y de calcita, en proporciones iguales al 50%. Se observan fragmentos de fósiles marinos en una proporción inferior al 1%.

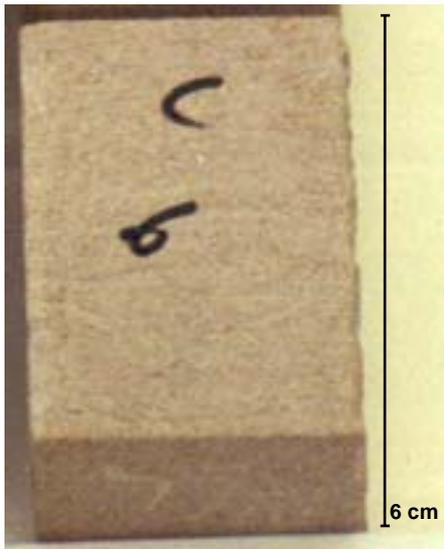
La matriz es carbonatada y el cemento es de tamaño micrita, también de composición carbonatada (ver foto 10 a microscopio).

Su porosidad es moderada y de tipo interparticular.

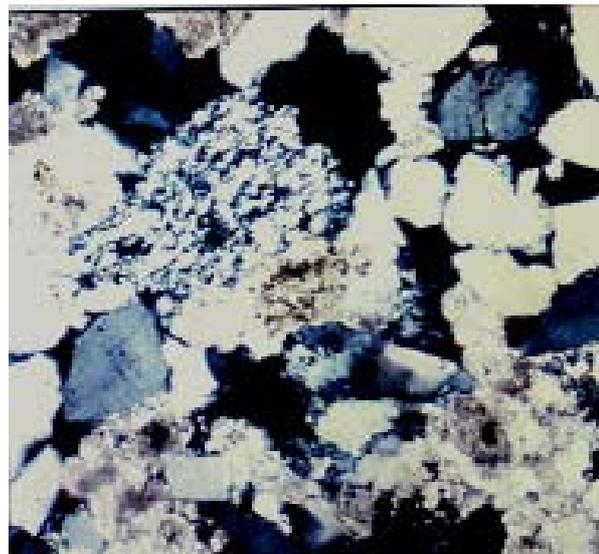
Según la clasificación de Pettijohn (1957) es una grauvaca lítica.

Posiblemente corresponde a un flysh de edad eocena.

Es una roca muy utilizada en el País Vasco (El Santuario de Begoña, en Bilbao, está construida completamente con este material).



**Foto 9.** Observación “a visu” de la Arenisca de Begoña.



**Foto 10.** Observación a microscopio óptico con nicoles paralelos de la Arenisca de Begoña.

### 3.6 Caracterización petrográfica de la Arenisca de Montjuïc

Es una arenisca de grano fino y laminación planar paralela, de color gris amarillento (yellowish gray 5Y 8/1) (ver foto 11).

La arenisca de Montjuïc se formó como un depósito sedimentario detrítico en ambiente deltaico. Esta roca ha sufrido importantes modificaciones (principalmente una extensa silicificación, por circulación intersticial de aguas ácidas a baja temperatura) que han conducido a la desaparición del cemento carbonatado originario y su matriz arcillosa (hasta un 50-55 % del volumen original), así como a la argilización (o neoformación de adularia) a expensas de los feldespatos y fragmentos líticos (San Miguel y Masriera 1970, Gómez Gras et al. 2000, 2001, Parcerisa et al. 2001, Parcerisa 2002).

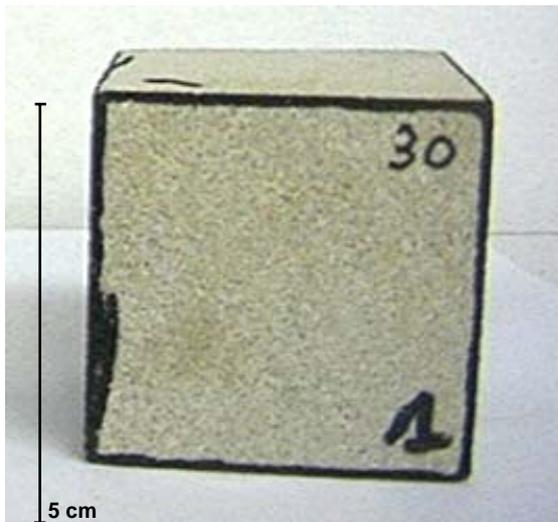
A escala microscópica, el resultado ha sido la formación de una roca esencialmente formada por clastos silíceos con un cemento igualmente silíceo (cuarzo, o más raramente ópalo) (ver foto 12 a microscopio). Desde un punto de vista petrográfico por lo tanto esta roca puede ser descrita como una ortocuarcita, en el sentido más clásico del término. Sin embargo, en aquellas porciones minoritarias de la roca preservadas sin estar afectadas por silicificación (normalmente no empleadas en construcción, por su carácter deleznable) pueden ser

clasificadas como una litarenita o sublitarenita (Parcerisa et al. 2001), o bien como grauwackas líticas (según clasificación de la Pettijohn 1957)

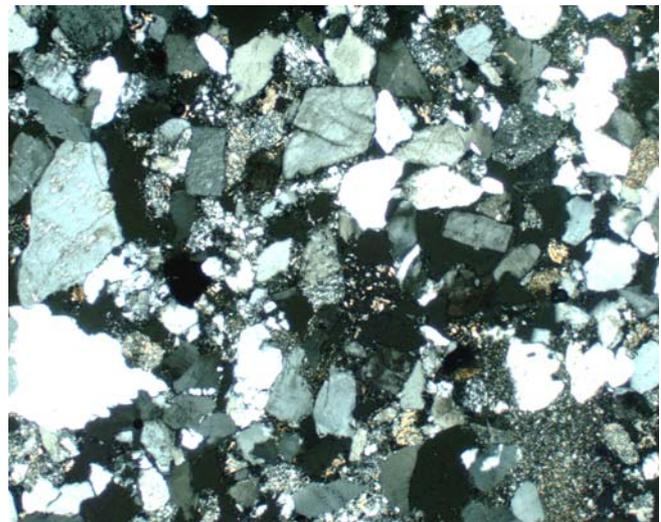
Su porosidad es moderada y de tipo interparticular.

Roca de edad miocénica, concretamente del Serravalliense (Gómez Gras et al. 2000, 2001)

Se trata de la principal roca empleada en construcción en Barcelona desde la fundación de la ciudad en época romana hasta inicios del siglo XX; por lo tanto muchos edificios públicos de la Ciutat Vella (Catedral, Santa Maria del Mar, Palau de la Generalitat, Ajuntament, Palau de la Virreina, etc.) y gran parte de la obra civil privada del ensanche de la segunda mitad del XIX presentan esta litología; hecho que justifica que haya sido incluida en este estudio.



**Foto 11.** Observación "a visu" de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 12.** Observación a microscopio óptico con nicoles paralelos de la Arenisca de Montjuïc.

### 3.7 Caracterización petrográfica del mortero sintético Parrot's Mix nº4

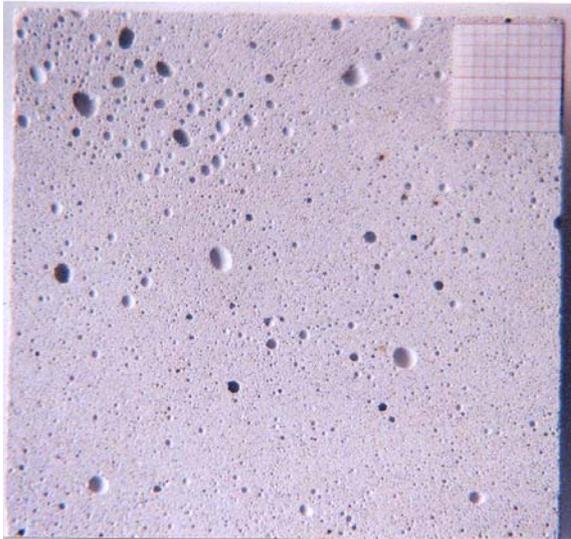
El mortero sintético de reposición Parrot's Mix nº4 es un producto que comercializa Pinturas Parrot. Su presentación es en forma de polvo. Para obtener el mortero se ha de mezclar el polvo con un diluyente formado por Adit 6, que es una resina acrílica, y agua en una proporción 1:3, hasta obtener una pasta con consistencia (por cada 100 gr. de Mix nº4 se recomienda utilizar entre 40 y 45 gr. de diluyente).

Su composición química porcentual, según la información suministrada por el director del laboratorio de la empresa, es la siguiente: SiO<sub>2</sub> (37,5%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15,8%) Ca(OH)<sub>2</sub> (6,9%), CaO (31,4%), y aditivos varios (8%).

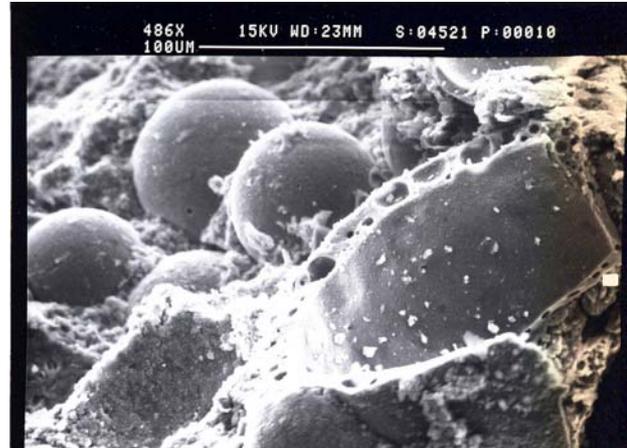
Una vez fraguado y transcurridos 28 días, se puede observar a simple vista la gran porosidad que presenta (ver foto 13). Es de color gris (grey, entre los números 7 y 8), pero admite colorantes y carga para asimilarlo a las rocas naturales.

La observación a microscopio óptico petrográfico no permite identificar ningún mineral cristalizado.

Si se observa con el microscopio electrónico de barrido se aprecian dos elementos bien diferenciados: una matriz de grano fino, en la que no se distingue ningún mineral cristalizado y que engloba unas esferas huecas, de paredes muy porosas (ver foto 14).



**Foto 13.** Observación “a visu” de Parrot’s Mix 4.



**Foto 14.** Observación a microscopio electrónico de Parrot’s Mix 4.

## 4 CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA Y ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO

La caracterización petrofísica y el envejecimiento artificial acelerado de las rocas estudiadas se han realizado según la metodología descrita en el capítulo 2.

Para la realización de estos ensayos sobre la arenisca del Figaró, la calcilita del Lorito, la arenisca de Montjuïc y la piedra artificial Parrot's Mix nº4 se han utilizado probetas cúbicas, de  $5\pm 0,2$  cm de arista.

Las probetas del primer tipo de piedra natural fueron facilitadas por la empresa “Piedra Natural Leiro, S.A.”, que estaba interesada en conocer las características petrofísicas de esta roca que ellos explotan y comercializan.

El segundo tipo de piedra natural procede de la cantera del Lorito, de Tarragona, y las probetas fueron confeccionadas en el Servicio de lámina delgada del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona.

El tercer tipo de piedra natural procede de una losa hallada en los escombros de un edificio del casco antiguo de Barcelona, y las probetas fueron confeccionadas en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona de la Universidad Politécnica de Barcelona.

Las probetas de la piedra artificial fueron pastadas por la empresa Pinturas Parrot y fueron confeccionadas en el Servicio de lámina delgada del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona.

La forma de las probetas ensayadas de la caliza de Hontoria y las areniscas de Durango y Begoña es prismática, de base rectangular de 2,7 x 4 cm y altura de 6 cm.

Las probetas fueron suministradas por la empresa José Ignacio Legorburu, S.L., que estaba interesada en conocer las características de estos tipos de roca, y el tratamiento conservativo más adecuado en cada caso, de entre los productos de la marca Pinturas Parrot.

El ensayo de permeabilidad al vapor de agua se ha realizado con prismas de 5x5 cm de base y 1,5 cm de altura en todos los casos.

### 4.1 Arenisca del Figaró

#### 4.1.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 1 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
F	9,89	4,08	0,93	5,00	80,00	107,20

**Tabla 1.** Propiedades petrofísicas de la arenisca del Figaró (F).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Esta arenisca tiene baja porosidad y, en condiciones de vacío, absorbe poca cantidad de agua. Succiona agua por capilaridad a una velocidad lenta; en la figura 1 se puede observar la dinámica con la que succionan tres probetas de este tipo de roca.

En un periodo de 14 días, la arenisca consigue desorber casi la totalidad del agua acumulada en el ensayo de absorción al vacío, y, aunque inicialmente no desorbe a gran velocidad (como se observa en la figura 2) su dinámica global es rápida.

Las probetas absorben agua rápidamente en condiciones ambientales, y en sólo 4 horas son capaces de alcanzar casi el 80% de saturación respecto a la obtenida en condiciones de vacío (ver figura 3).

Estos valores permiten determinar que la porosidad de esta roca está bien conectada, y que es de radio de acceso moderado, ya que el agua circula por su través sin dificultad, tanto para entrar como para salir de la roca.

La permeabilidad al vapor de agua es moderada, y no se aprecian variaciones importantes entre las probetas ensayadas con la estratificación paralela a la superficie ( $108,98 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ ) y las probetas con la estratificación perpendicular a la misma ( $105,42 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ ), ya que esta estratificación es de tipo cruzada, sin existir conductos puramente perpendiculares a la superficie (ver figura 4).

#### 4.1.2 Envejecimiento artificial acelerado mediante cristalización de sales

En la figura 5 se observa la variación de masa experimentada por las probetas a lo largo de los 12 ciclos.

La pérdida de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 0,64%.

A partir del tercer ciclo puede observarse la incipiente alteración de la roca: Primero se produce una arenización superficial. Posteriormente se van formando pequeñas ampollas que poco a poco se van fracturando, hasta eclosionar por completo; debajo de éstas el material se halla más arenizado.

La alteración más intensa se da en las caras paralelas a la estratificación. También se aprecia que en los niveles con mayor contenido de matriz (niveles oscuros), y en los límites de "sets" de laminación, la alteración es más intensa (ver fotos 15 y 16).

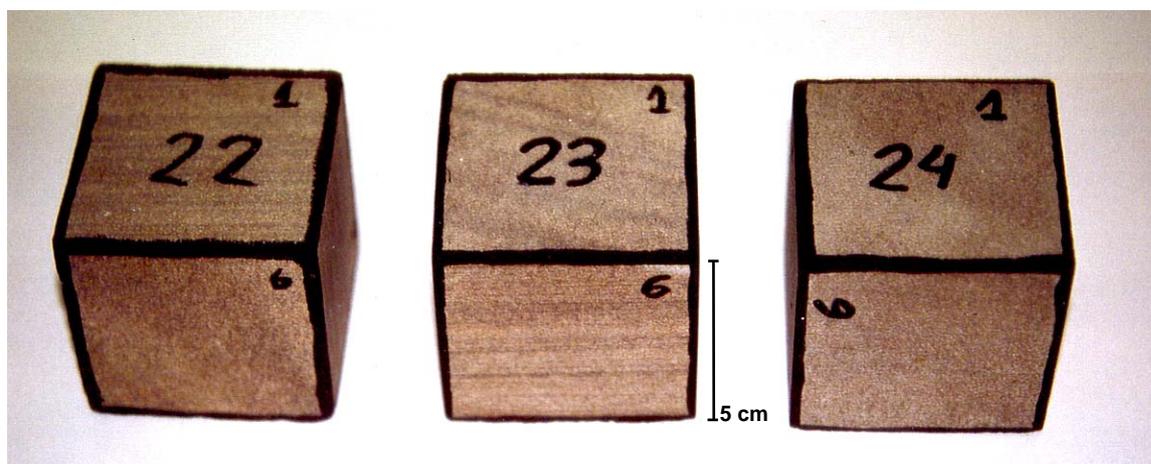


Foto 15. Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.

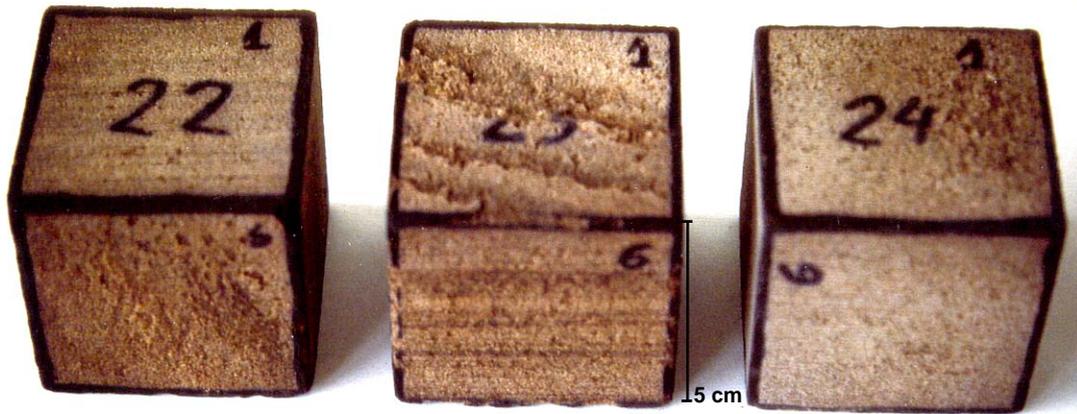


Foto 16. Probetas envejecidas de la Arenisca del Figaró.

#### 4.1.3 Comentario

Esta roca tiene una composición mineralógica no atacable químicamente por el sulfato sódico. Tiene una porosidad baja y un grado de absorción de agua bajo. Desorbe fácilmente, sin retener una cantidad de agua elevada. Una vez envejecida mediante la cristalización de sales, no presenta pérdidas de peso importantes.

Así pues, se trata de una roca bastante resistente al agua y a la actuación mecánica de sales solubles al cristalizar.

Teniendo en cuenta que la porosidad no es de accesibilidad difícil, y que las fuerzas mecánicas de cristalización que se generan en el ensayo de envejecimiento artificial acelerado son de menor intensidad que las que se generan en los cambios de fase de agua líquida a sólida, se supone que este nuevo agente alterológico tampoco la tendría que modificar excesivamente.

De hecho, en los últimos cinco años la autora ha colaborado en diversos trabajos fin de carrera de la licenciatura de Arquitectura Técnica de la UPC, realizando la diagnosis de diversos edificios de la provincia de Barcelona construidos con arenisca de Figaró (monasterio de Sant Ponç de Corbera, Iglesia de Santa Maria de Cervelló, etc.) quedando de manifiesto que este tipo de roca no es muy alterable, y que las principales formas de alteración son la arenización y la descamación.

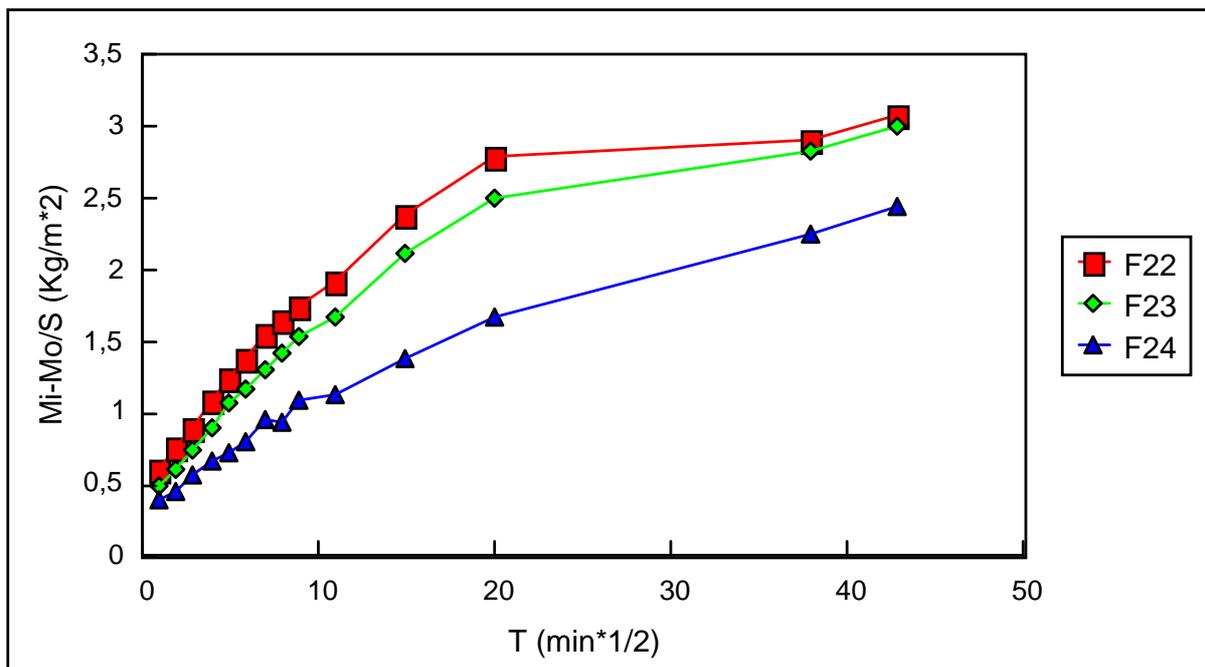


Figura 1. Succión capilar de la Arenisca del Figaró.

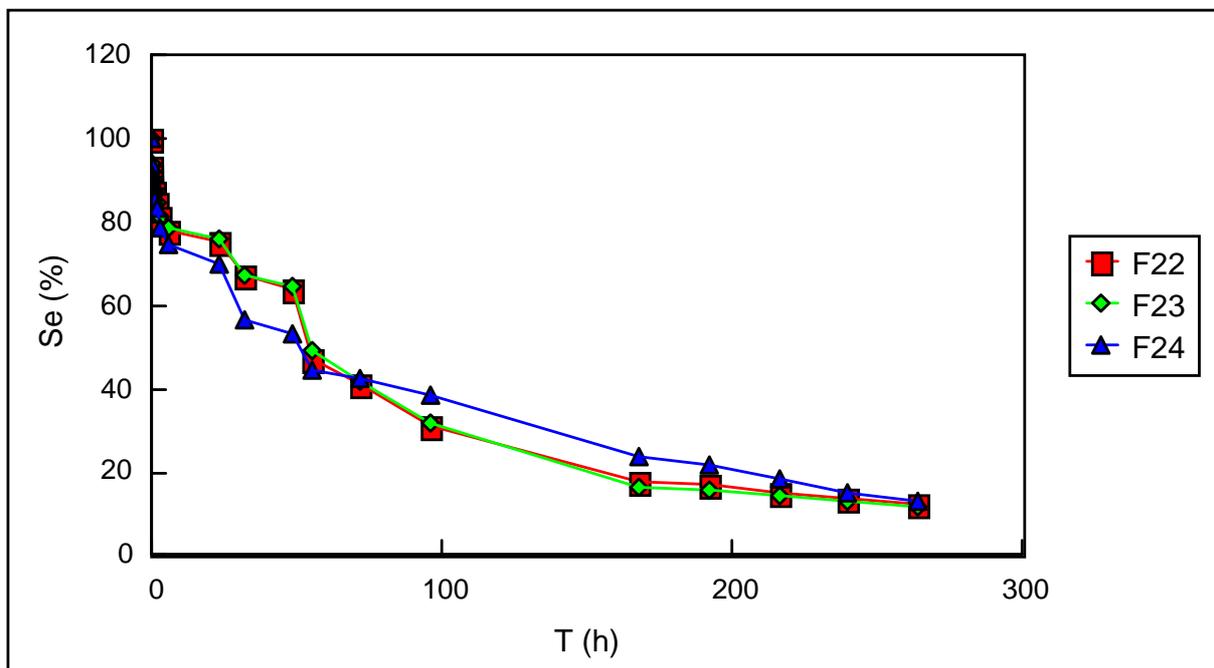


Figura 2. Desorción de la Arenisca del Figaró.

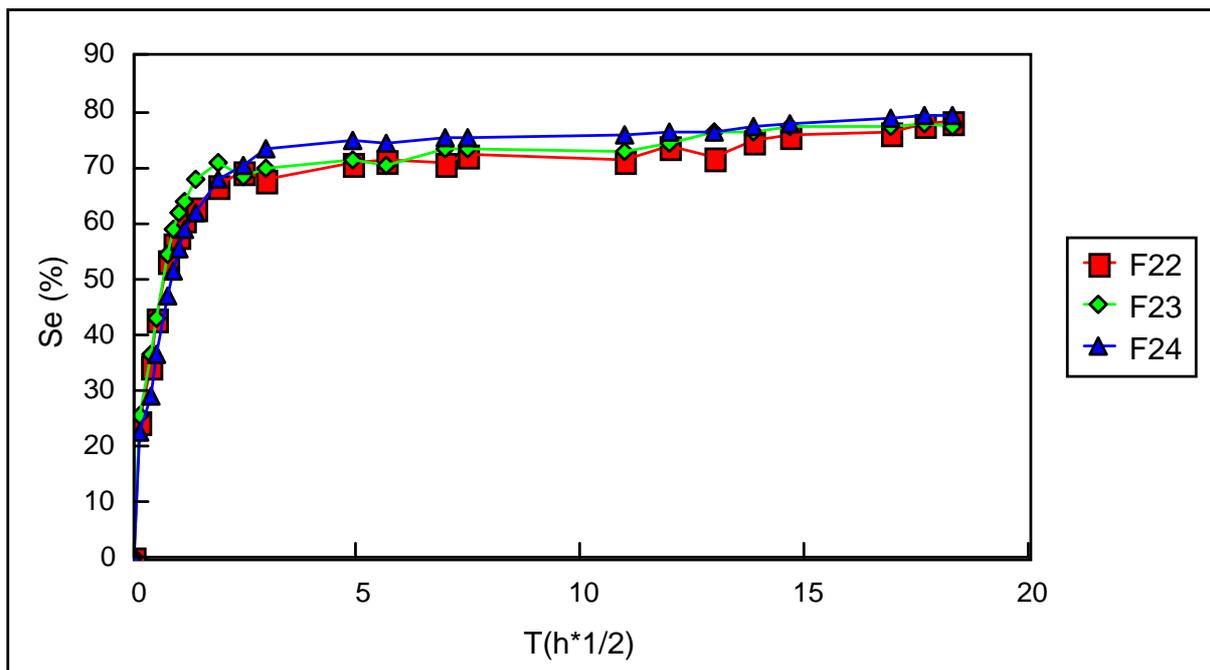


Figura 3. Absorción libre de la Arenisca del Figaró.

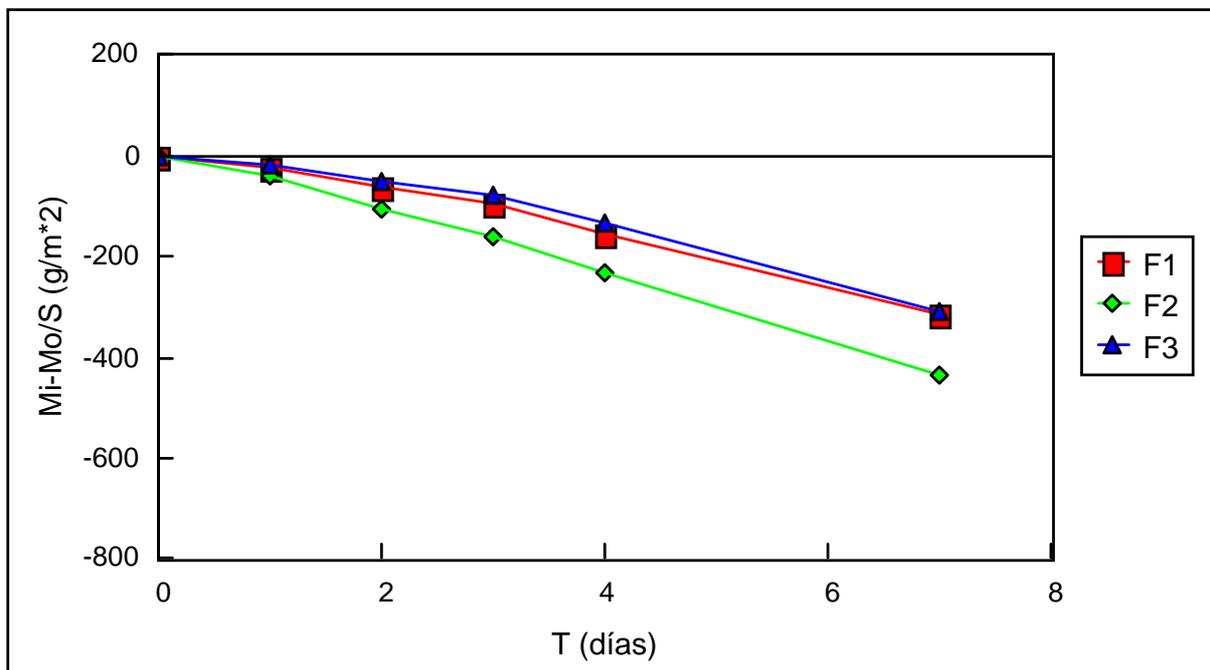
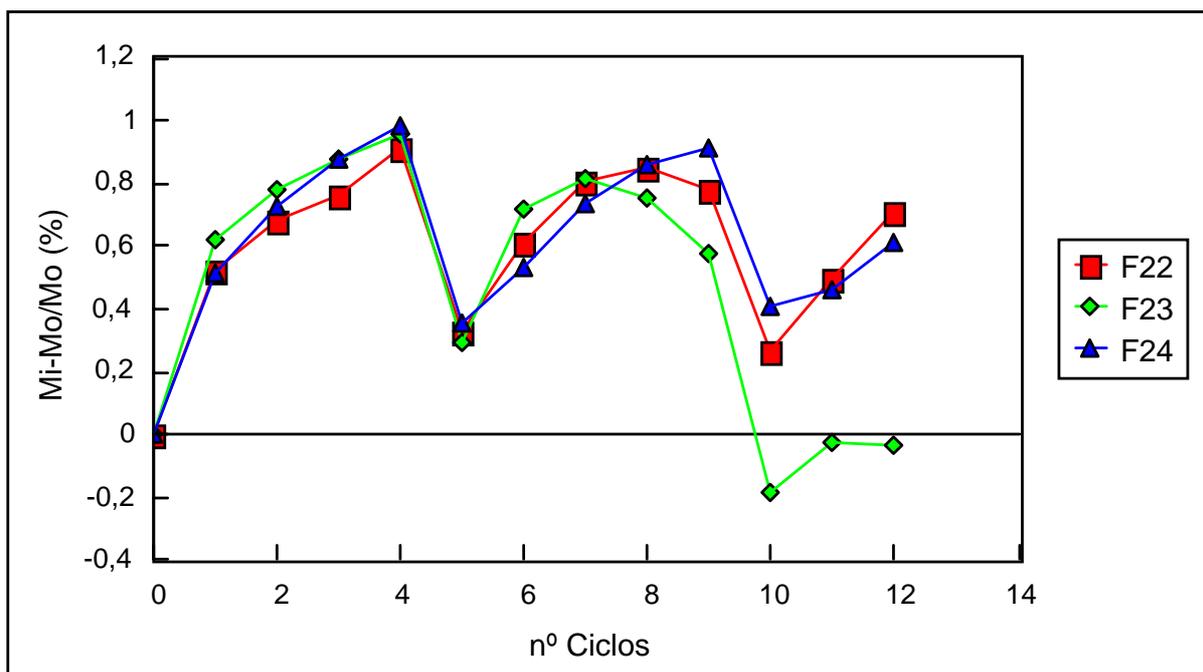


Figura 4. Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca del Figaró.



**Figura 5.** Cristalización de sales de la Arenisca del Figaró.

## 4.2 Calcilutita del Lorito

### 4.2.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 2 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
<b>L</b>	32,02	17,47	11,73	58,02	83,21	241,64

**Tabla 2.** Propiedades petrofísicas de la calcilutita del Lorito (L).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v'$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Esta caliza tiene una porosidad muy elevada y, en condiciones de vacío, absorbe gran cantidad de agua. Succiona agua por capilaridad a una velocidad elevada (ver figura 6).

Esta roca retiene una gran cantidad de agua al finalizar el ensayo de desorción, y la dinámica global de pérdida de agua es muy lenta (ver figura 7).

Las probetas absorben agua a una velocidad muy rápida en condiciones ambientales; transcurridas 48 horas de absorción libre adquieren un grado de saturación superior al 80% (ver figura 8).

La permeabilidad al vapor de agua es muy elevada (ver figura 9).

El movimiento del agua a través de la porosidad de esta roca, entrando gran cantidad de agua y fácilmente, pero saliendo lentamente, pone de manifiesto que se trata de una porosidad elevada, de radio de acceso muy pequeño, o muy mal comunicado.

De hecho, en la tesis de licenciatura de J.L. Prada (1995) ya se explica que además de la porosidad interparticular que presenta este tipo de roca, hay una elevada porosidad intraparticular de los granos de dolomita que se están dedolomitizando.

### 4.2.2 Envejecimiento artificial acelerado

En la figura 10 se observa la variación de masa experimentada por las probetas a lo largo de los 12 ciclos.

La pérdida de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 30,82%.

El tipo de alteración que sufre esta roca por el ataque salino es la arenización, que se inicia ya en el tercer ciclo; las aristas se van redondeando y al finalizar el ensayo la probeta ha adquirido una forma esférica (ver fotos 17 y 18).

### 4.2.3 Comentario

La calcilita del Lorito es una roca con una composición química inestable (Prada, J.L. 1995), formada por cristales de dolomita que, en presencia de sulfatos, se dedolomitizan. Tiene una porosidad muy elevada y tortuosa, mal comunicada, que permite que el agua permanezca durante largo tiempo en su interior.

Si esta agua que es capaz de retener contiene sales solubles, existe la posibilidad que éstas puedan cristalizar en el interior de la roca. Teniendo en cuenta que su estructura cristalina es débil, principalmente los cristales de dolomita, todo ello comporta que esta roca sea fácilmente alterable frente al ataque de las sales solubles.

Un caso real que corrobora esta explicación es el tramo de Muralla Romana de Tarragona, en el Passeig de Sant Antoni, donde se puede apreciar claramente que los sillares de esta litología están muy alterados, habiendo incluso perdido más del 75% de su grosor, mientras que los sillares de otras litologías, como la del Mèdol o Mas dels Arcs no han sufrido casi alteraciones (Àlvarez, A., Argemí, M., Navarro, A., Prada, J.L. 1992).

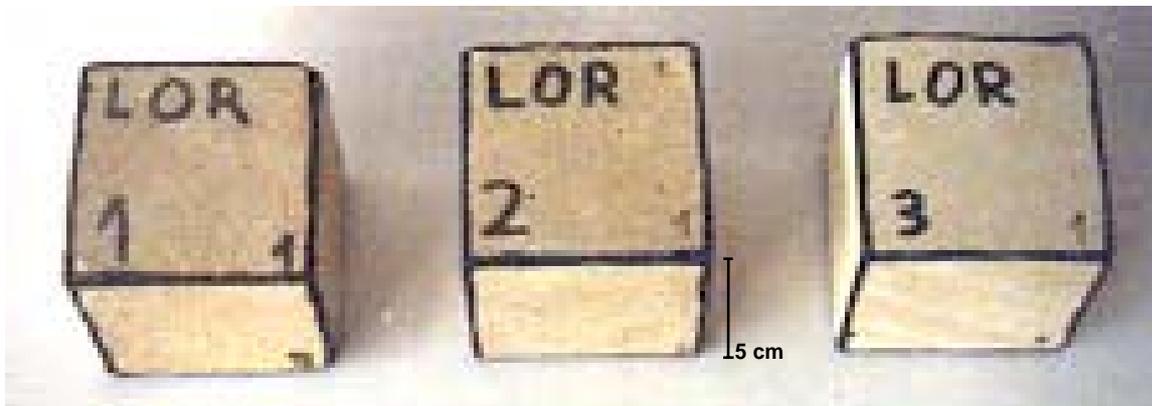


Foto 17. Probetas antes de ser envejecidas de la Calcilita del Lorito.

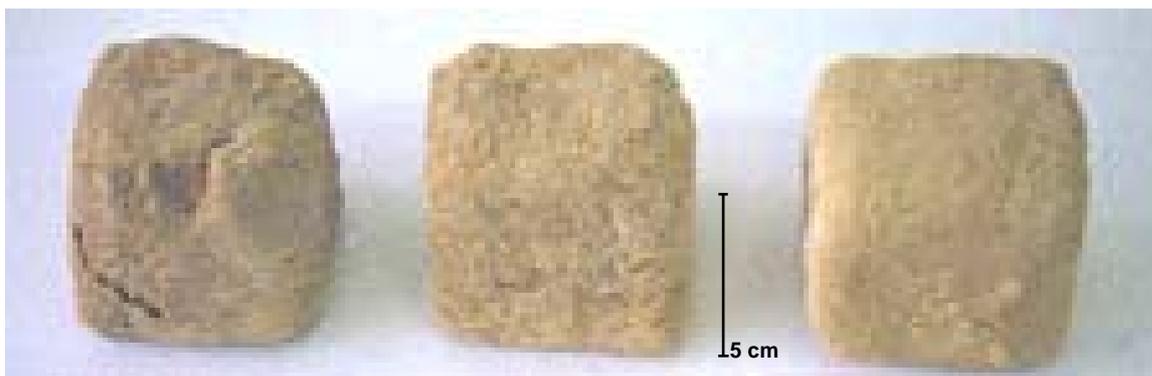


Foto 18. Probetas envejecidas de la Calcilita del Lorito.

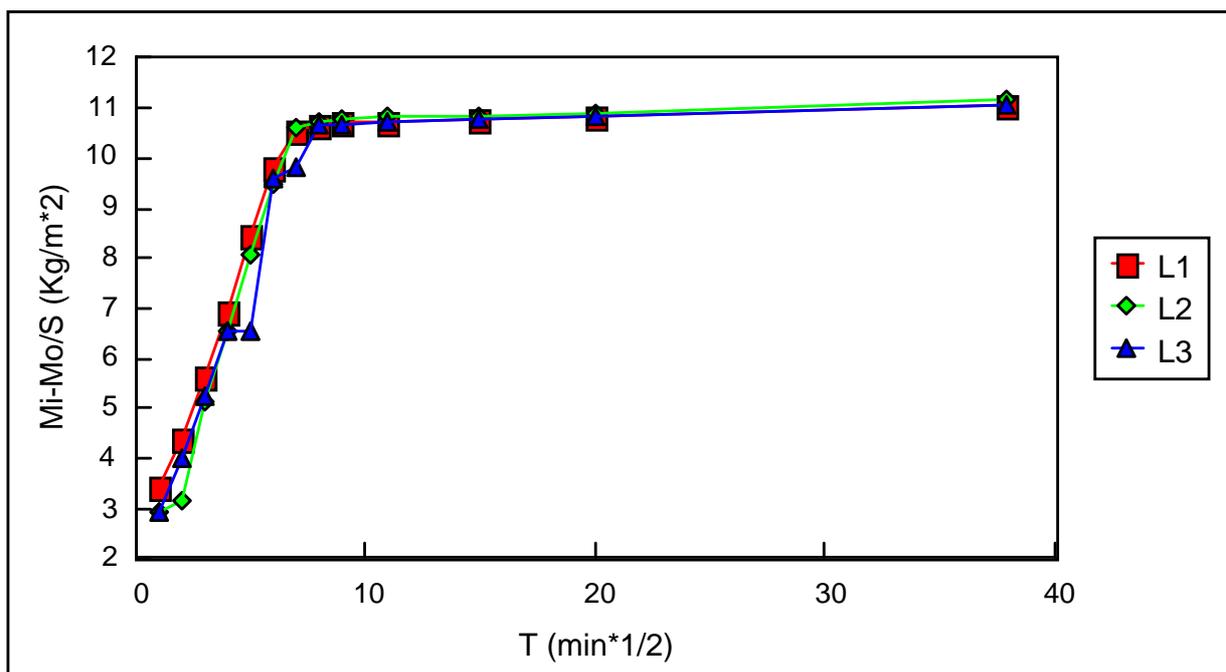


Figura 6. Succión capilar de la Calclutita del Lorito.

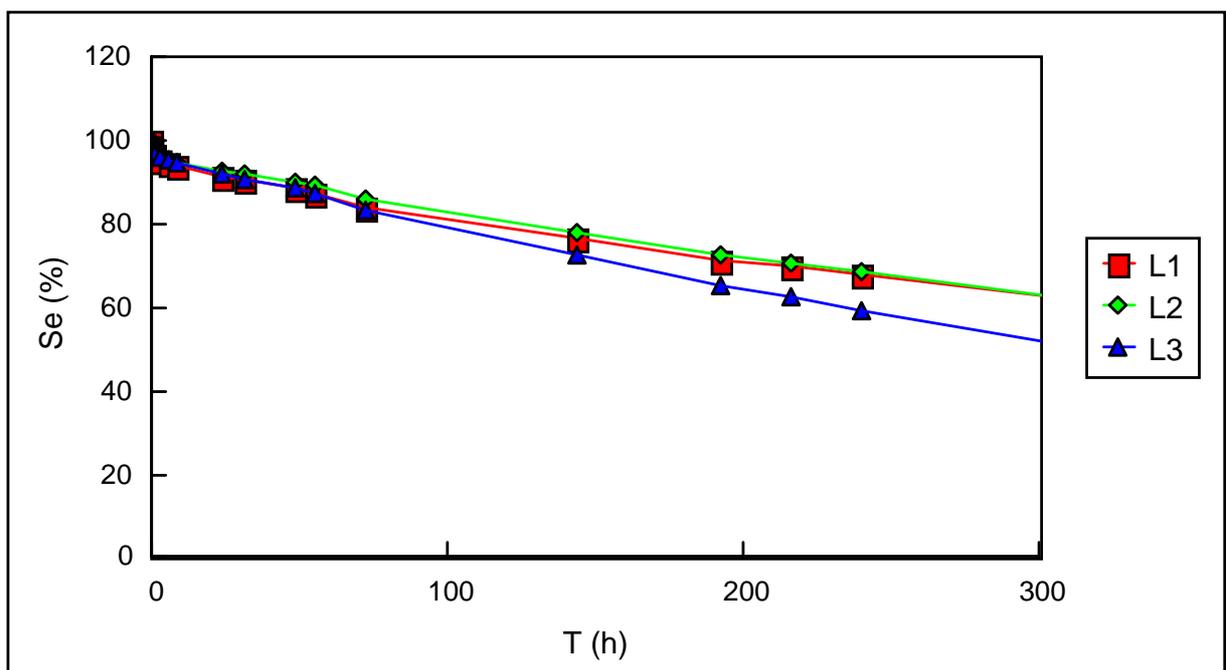
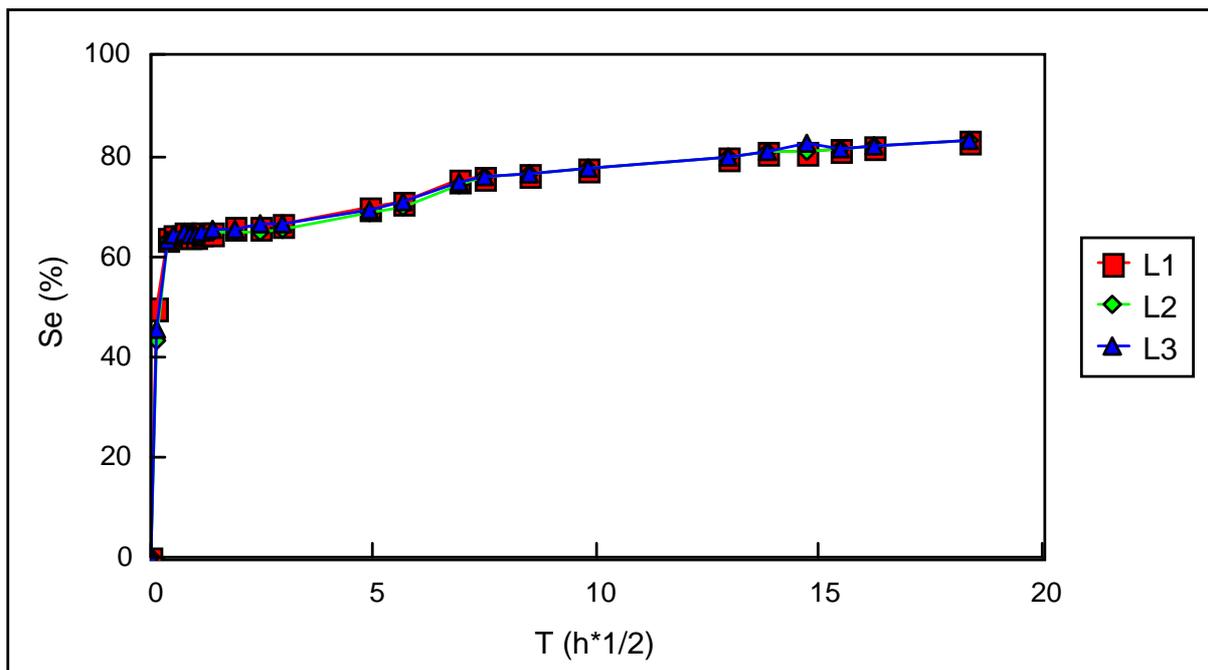
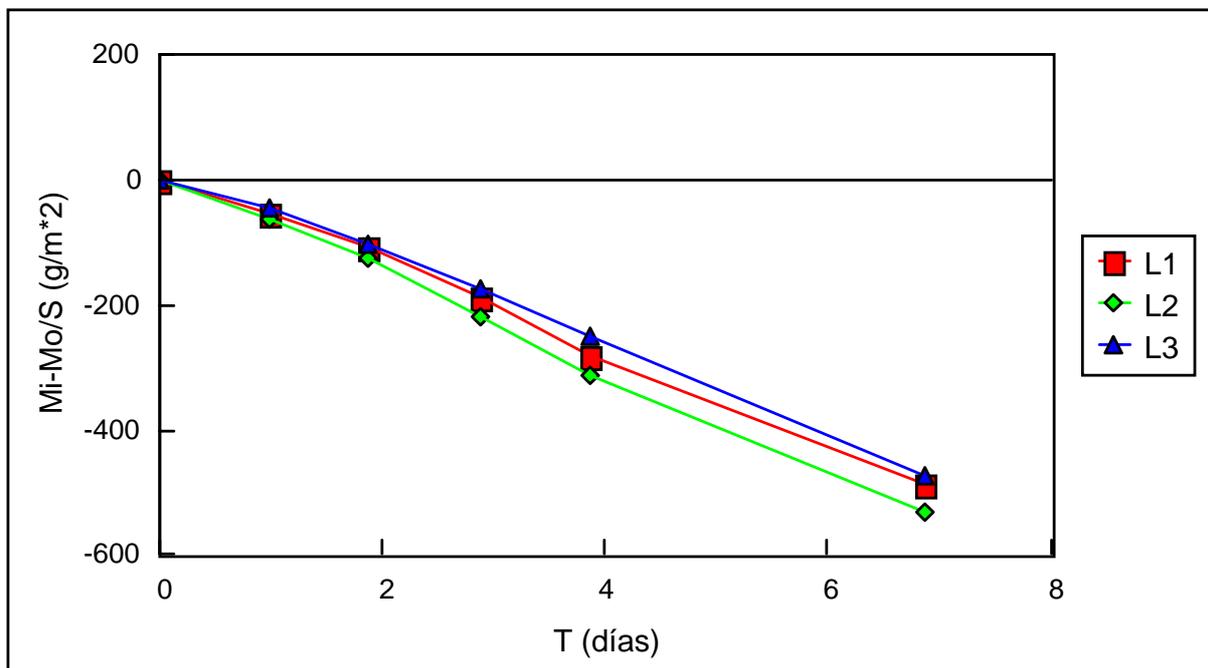


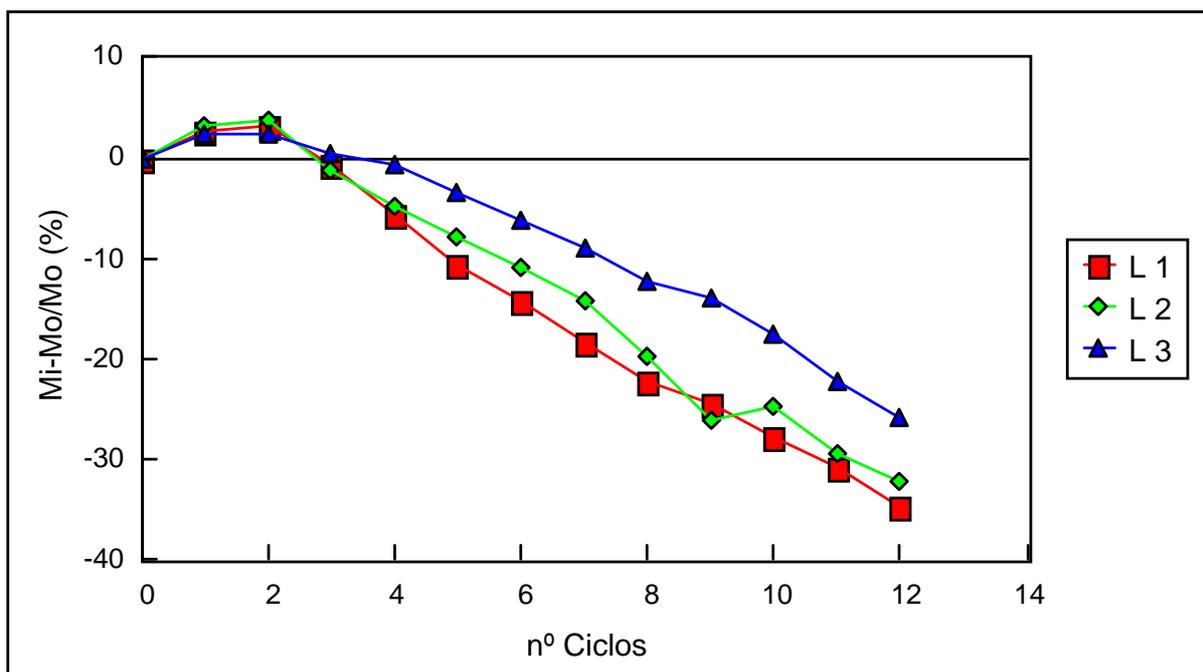
Figura 7. Desorción de la Calclutita del Lorito.



**Figura 8.** Absorción libre de la Calcilutita del Lorito.



**Figura 9.** Permeabilidad al vapor de agua de la Calcilutita del Lorito.



**Figura 10.** Cristalización de sales de la Calcilita del Lorito.

## 4.3 Caliza de Hontoria

### 4.3.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 3 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
A	22,24	10,54	4,68	32,65	79,32	124,62

**Tabla 3.** Propiedades petrofísicas de la caliza de Hontoria (A).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v'$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Tiene una porosidad elevada y absorbe bastante cantidad de agua en condiciones de vacío. La succión de agua por capilaridad también es rápida (ver figura 11).

Es significativo que al finalizar el ensayo de desorción (12 días), en el cual las probetas estaban inicialmente saturadas de agua, le queda acumulado un porcentaje de agua bastante elevado (ver figura 12).

Las probetas absorben agua a una velocidad rápida en condiciones ambientales; transcurridas 48 horas de absorción libre adquieren un grado de saturación superior al 70% (ver figura 13).

La permeabilidad al vapor de agua es elevada (ver figura 14).

Según los estudios disponibles (Esbert, R.M. y Díaz-Pache, F.; 1993), la configuración del sistema poroso de esta roca está muy marcada por la heterometría granular, que genera grandes espacios vacíos conectados por conductos de radio mucho más pequeño. Esta disposición es la causante del movimiento diferencial del agua, la cual es absorbida rápidamente y en cantidad importante, pero desorbida con dificultad.

### 4.3.2 Envejecimiento artificial acelerado

En la figura 15 se observa la variación de masa experimentada por las probetas a lo largo de los 12 ciclos.

La pérdida de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 0,51%.

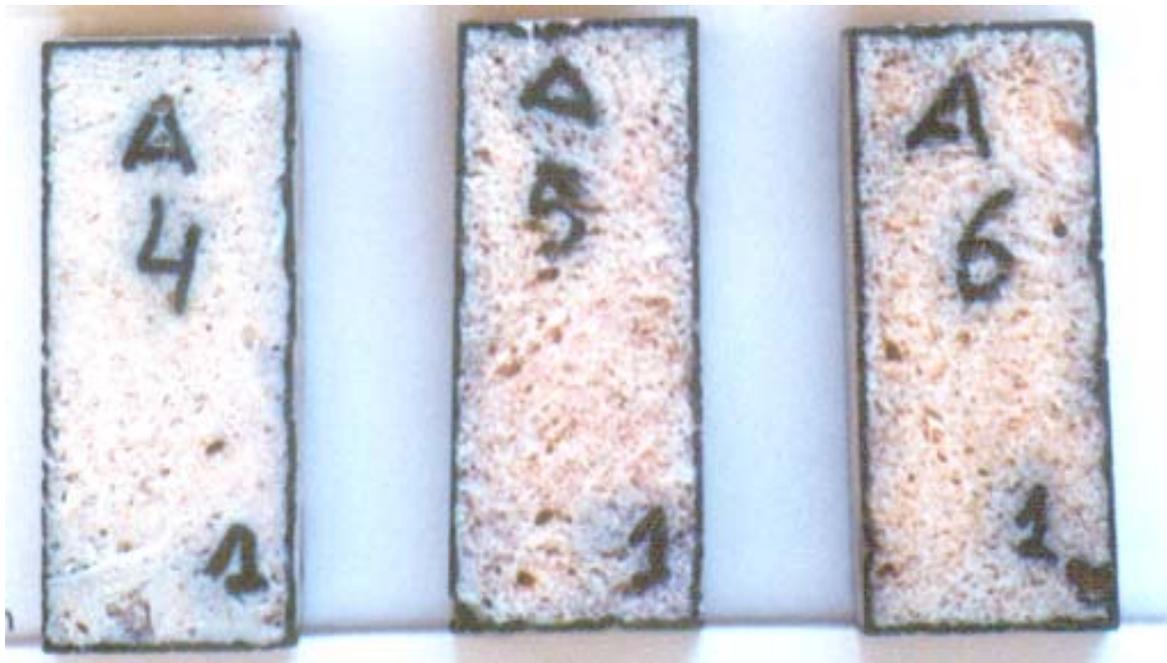
Esta roca se altera poco por el ataque salino, produciéndose una arenización incipiente a partir del ciclo 8 (ver fotos 19 y 20).

### 4.3.3 Comentario

La composición mineralógica de esta roca la hace resistente a la acción del agua. El hecho que la porosidad mayoritaria sea de radio de poro grande contribuye a la durabilidad de esta roca frente a la acción mecánica de agentes agresivos, como lo es la cristalización de sales solubles.



**Foto 19.** Probetas antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria.



**Foto 20.** Probetas envejecidas de la Caliza de Hontoria.

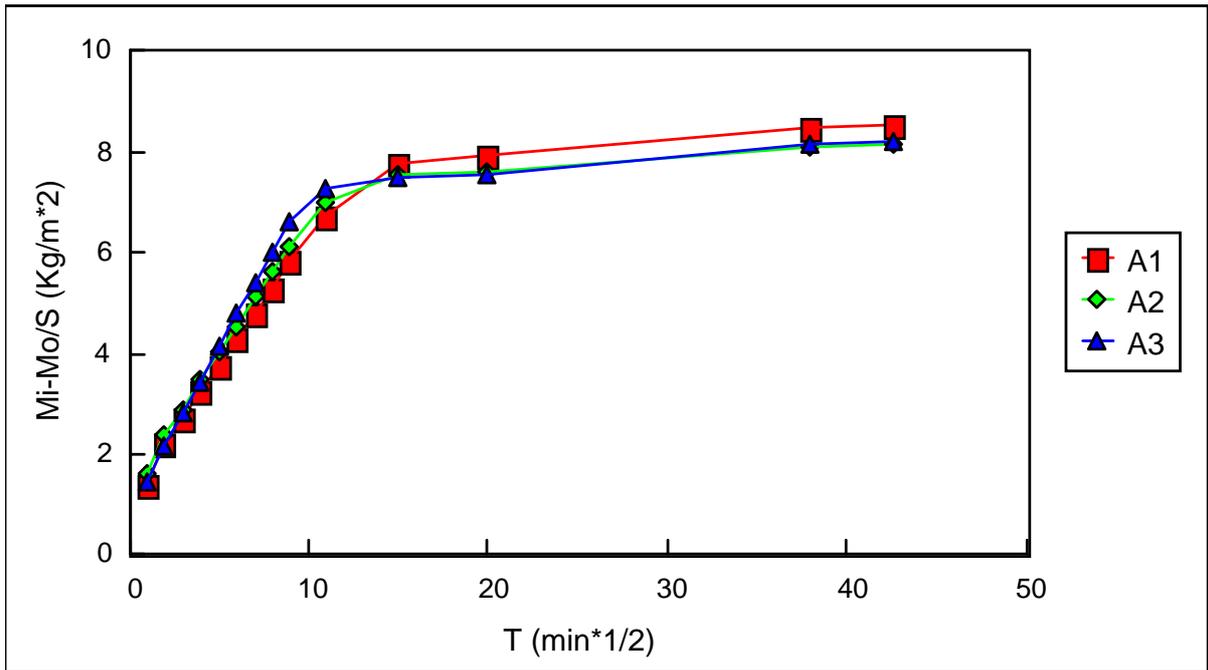


Figura 11. Succión capilar de la Caliza de Hontoria.

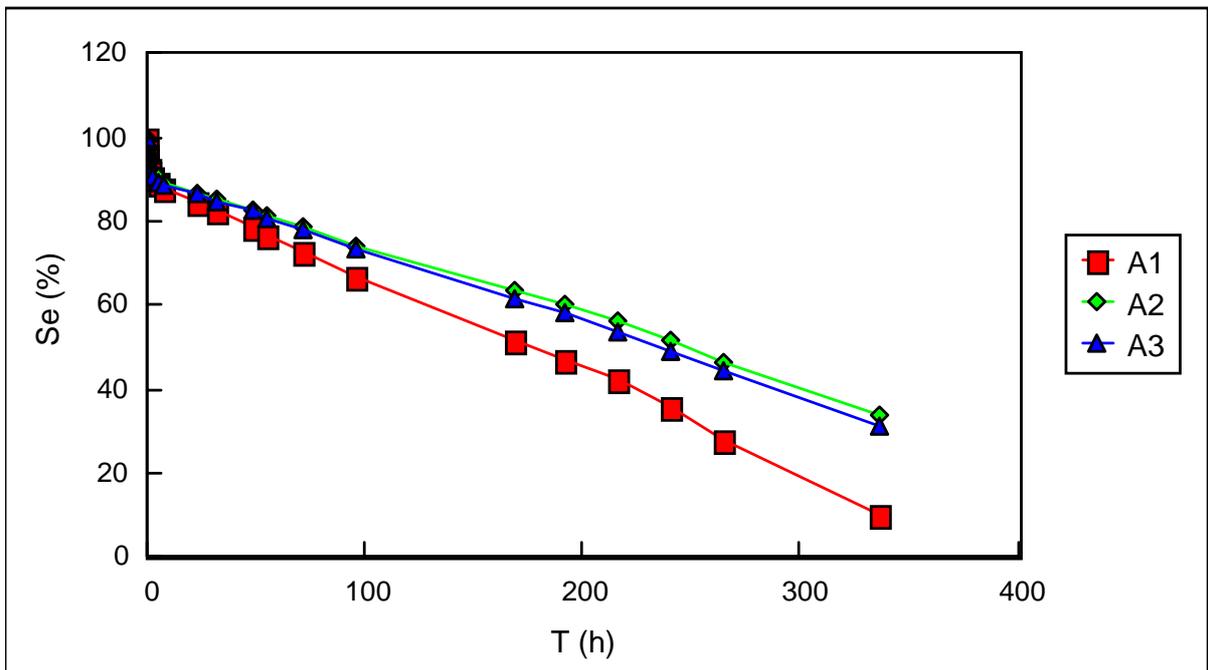


Figura 12. Desorción de la Caliza de Hontoria.

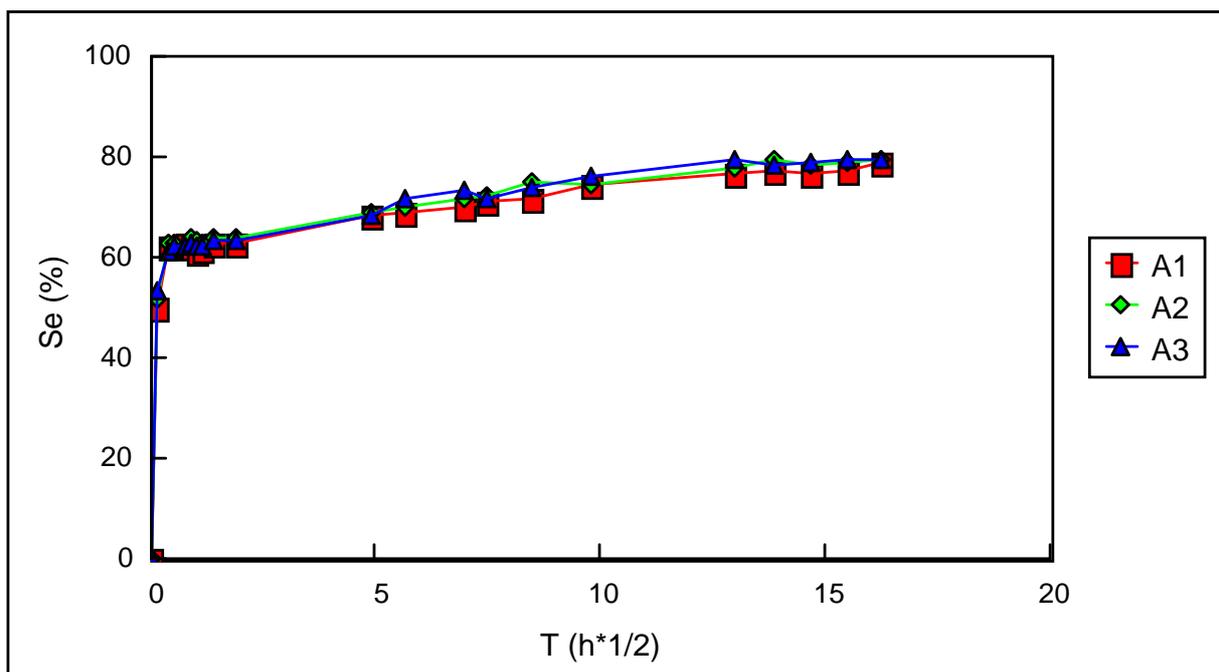


Figura 13. Absorción libre de la Caliza de Hontoria.

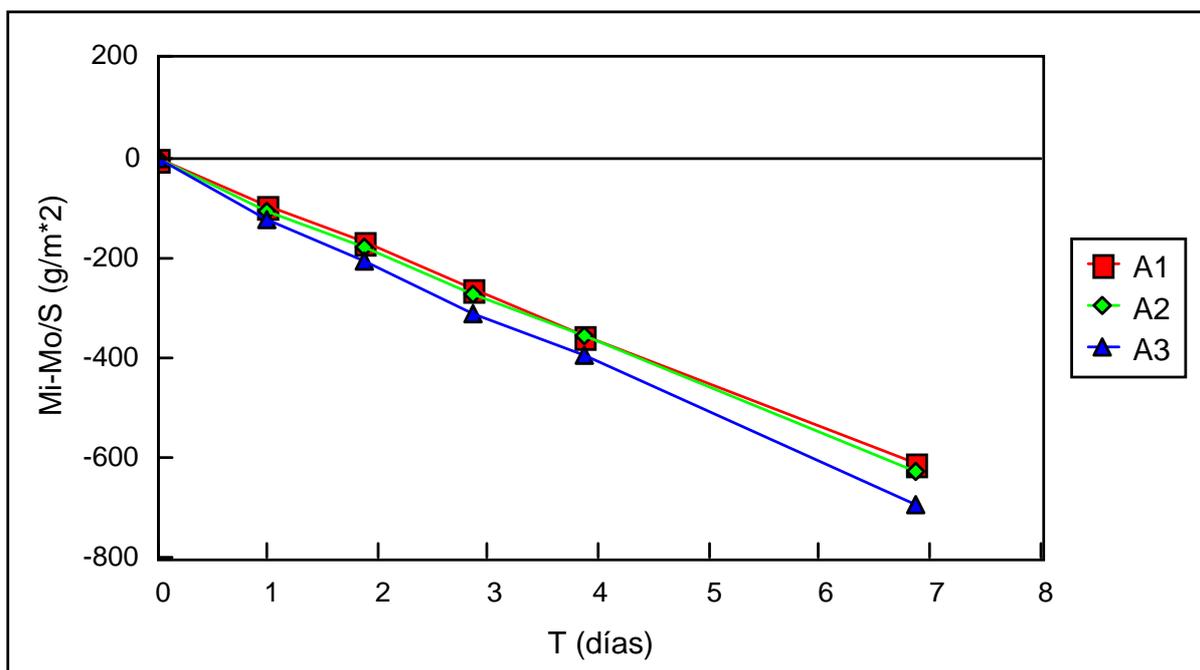


Figura 14. Permeabilidad al vapor de agua de la Caliza de Hontoria.

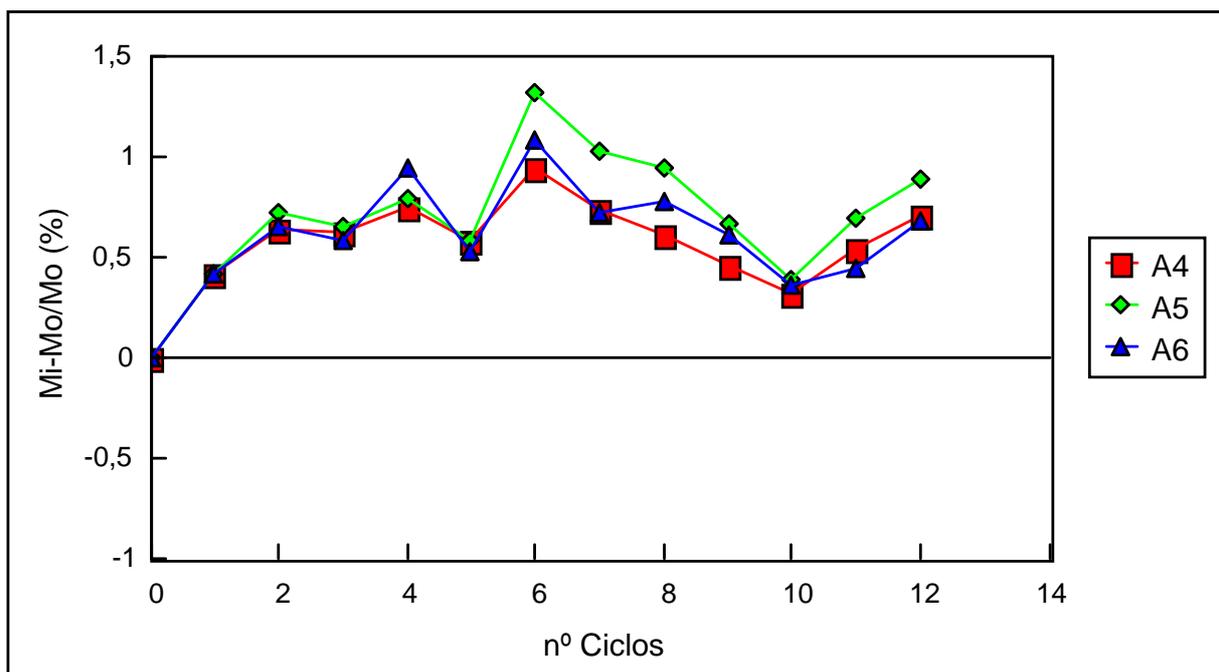


Figura 15. Cristalización de sales de la Caliza de Hontoria.

## 4.4 Arenisca de Durango

### 4.4.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 4 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m h <sup>2,1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
<b>B</b>	10,29	4,24	1,35	52,09	82,49	76,50

**Tabla 4.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Durango (B).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v'$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Es una roca no muy porosa, que succiona el agua lentamente (ver figura 16) y en condiciones de vacío absorbe poca cantidad de agua.

Tras la desorción (12 días), las probetas todavía retienen un porcentaje de agua muy elevado (ver figura 17).

Las probetas absorben agua a una velocidad rápida en condiciones ambientales; transcurridas 48 horas de absorción libre adquieren un grado de saturación superior al 70% (ver figura 18).

La permeabilidad al vapor de agua es baja (ver figura 19).

La movilidad del agua a través de la red porosa de esta roca puede estar condicionada por una porosidad mal comunicada. La presencia de arcillas también podría contribuir a la retención del agua absorbida.

### 4.4.2 Envejecimiento artificial acelerado

En la figura 20 se observa la variación de masa experimentada por las probetas a lo largo de los 12 ciclos.

La pérdida de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 0,58%.

Esta roca se altera moderadamente por el ataque salino, iniciándose una arenización a partir del ciclo 7, llegándose a producir una erosión de las aristas de las probetas al finalizar el ensayo (ver fotos 21 y 22).

#### 4.4.3 Comentario

La composición mineralógica de esta roca, en particular la presencia de nódulos de arcillas, así como su porosidad, la hacen vulnerable ante la presencia de agua y débil frente a los esfuerzos mecánicos de cristalización de sales dentro de su porosidad.

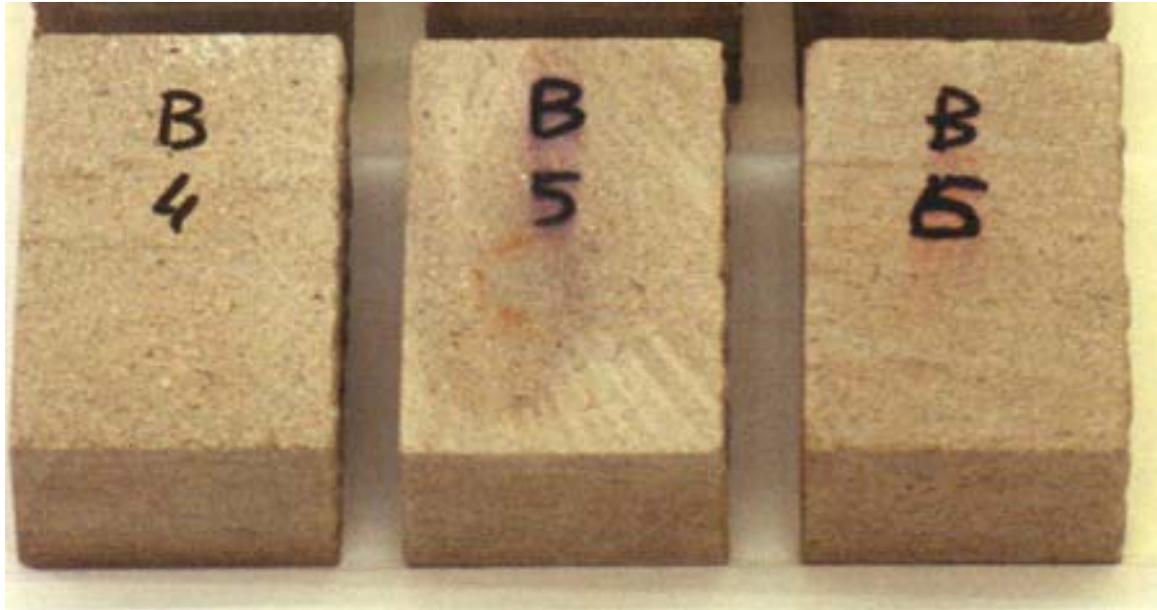


Foto 21. Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango.

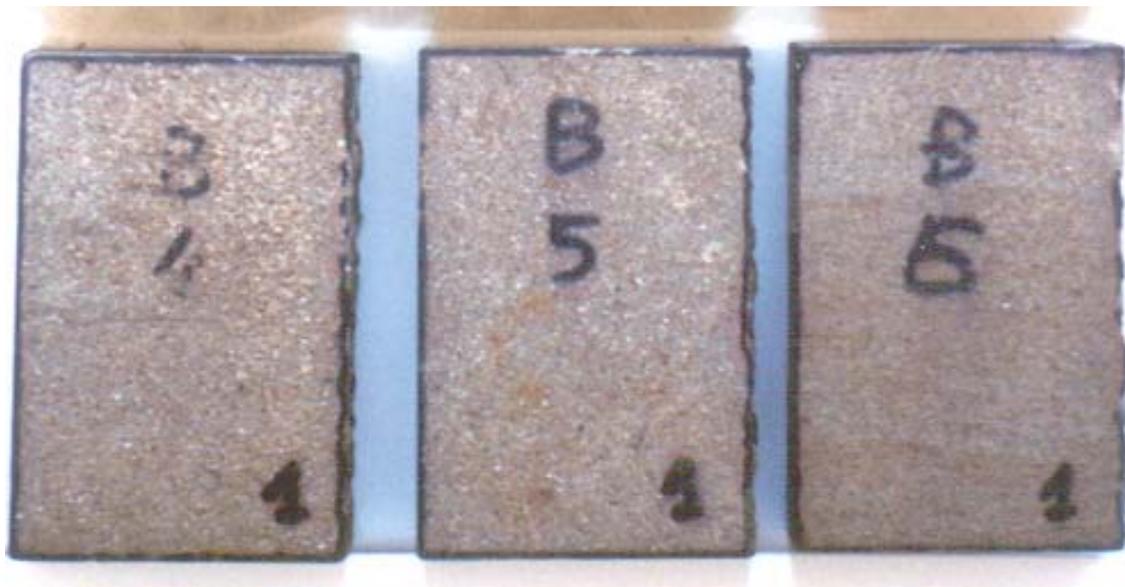


Foto 22. Probetas envejecidas de la Arenisca de Durango.

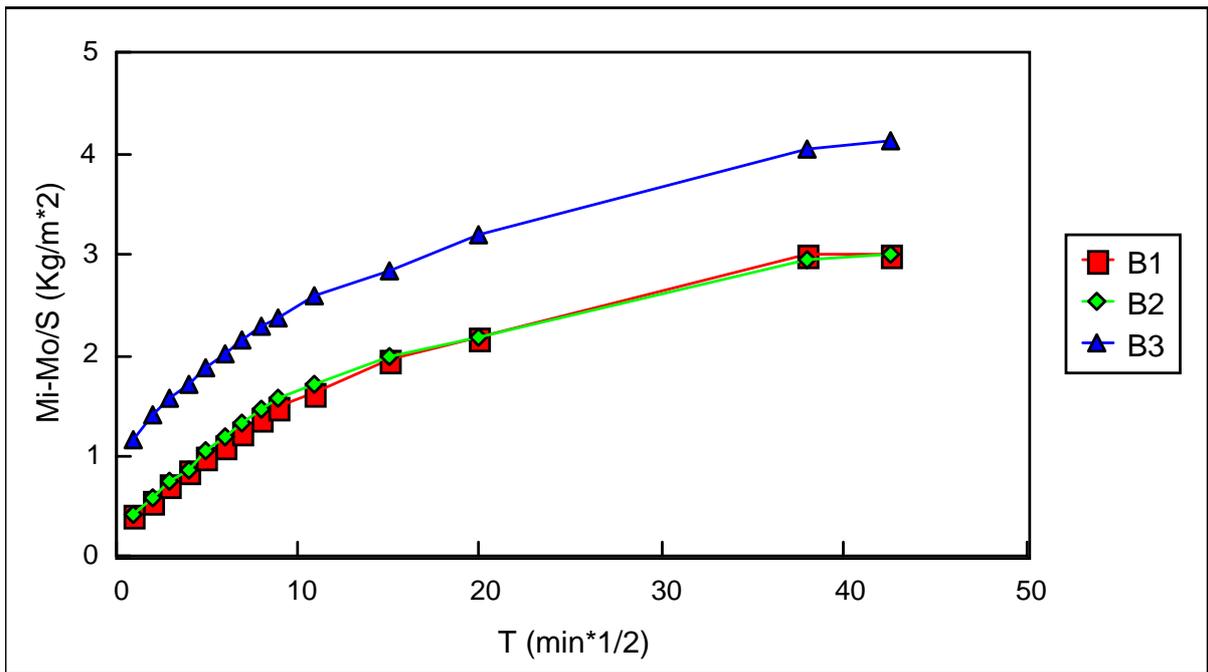


Figura 16. Succión capilar de la Arenisca de Durango.

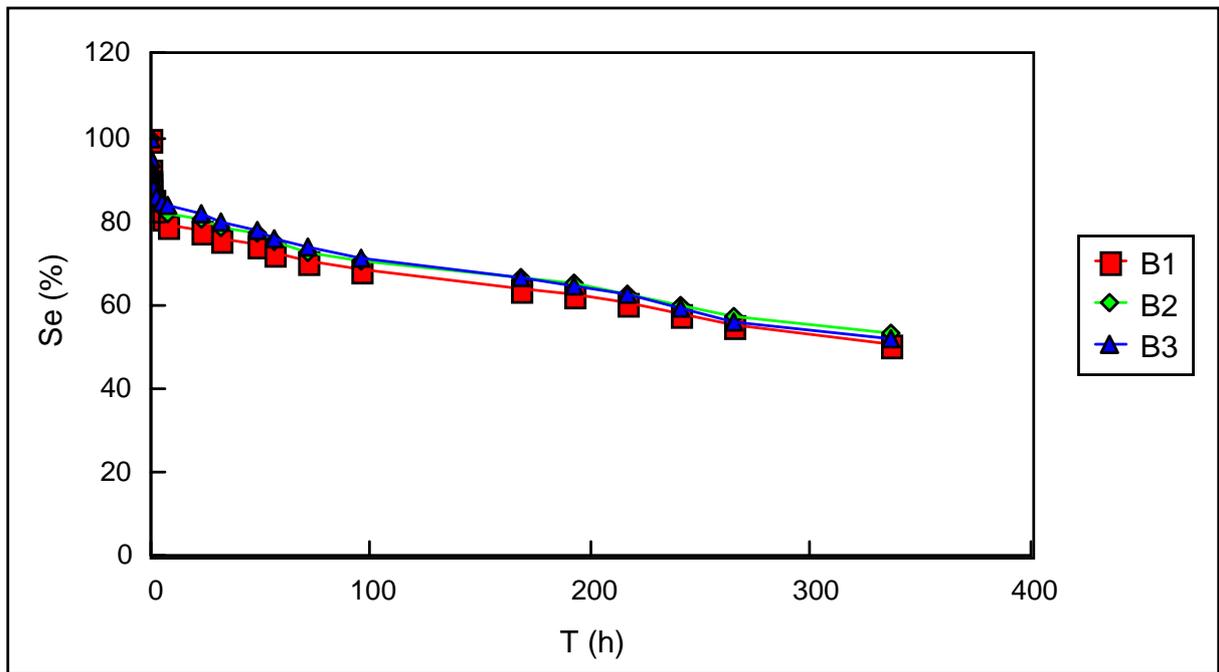


Figura 17. Desorción de la Arenisca de Durango.

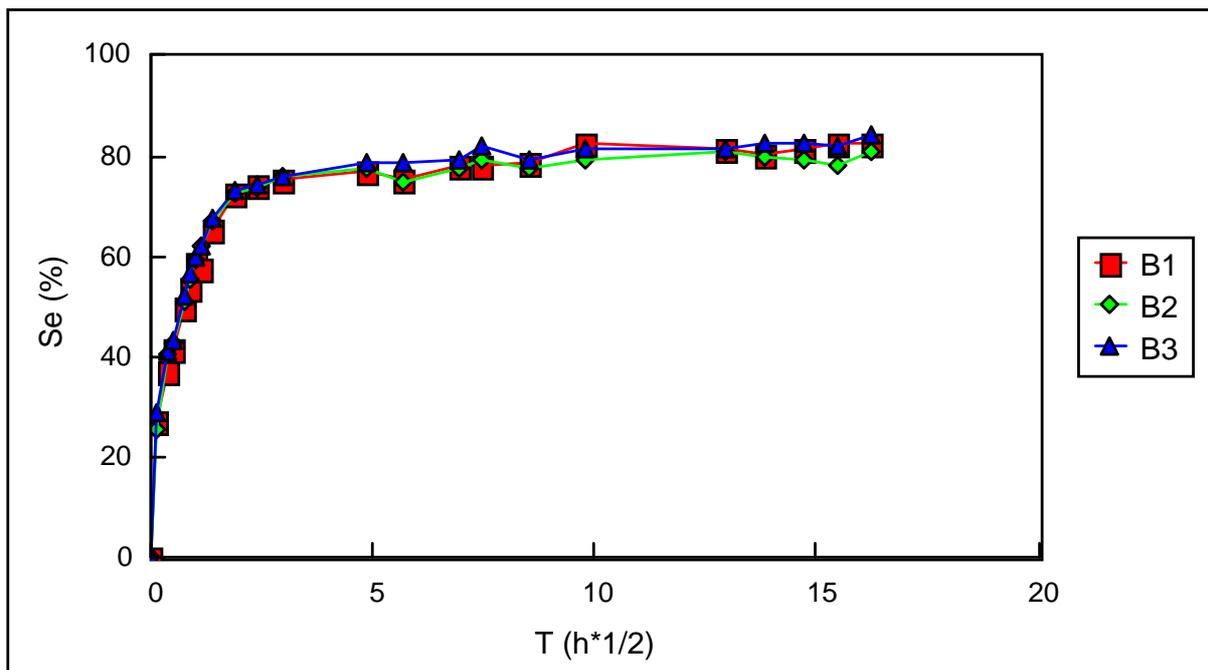


Figura 18. Absorción libre de la Arenisca de Durango.

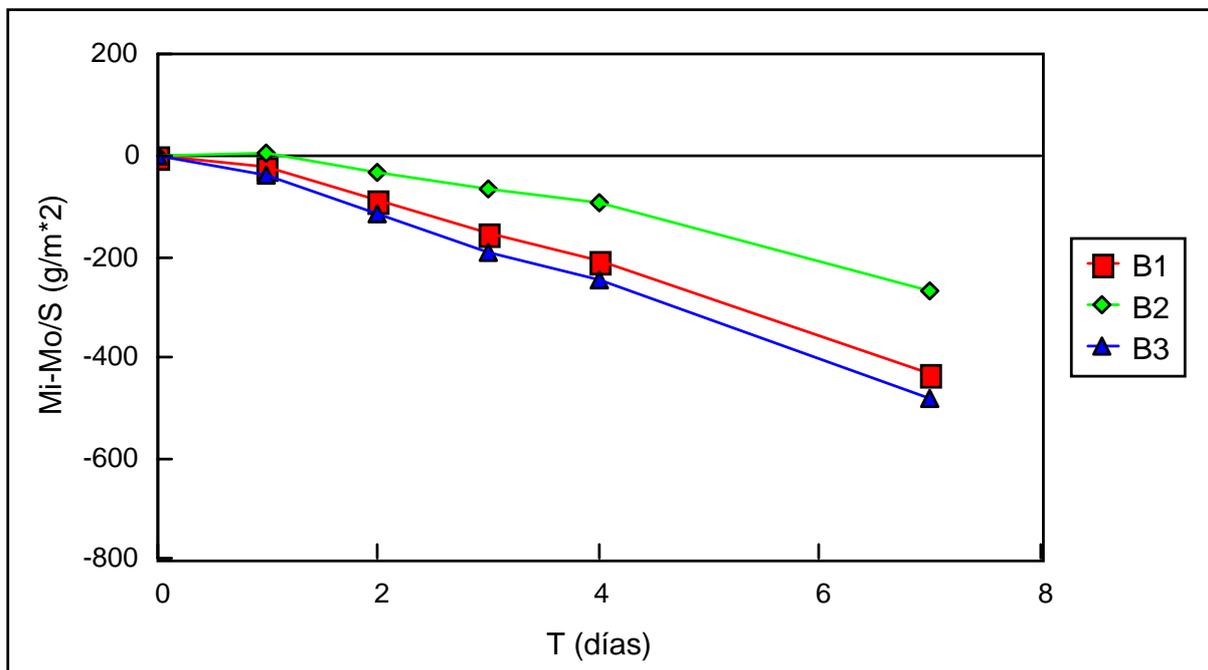


Figura 19. Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Durango.

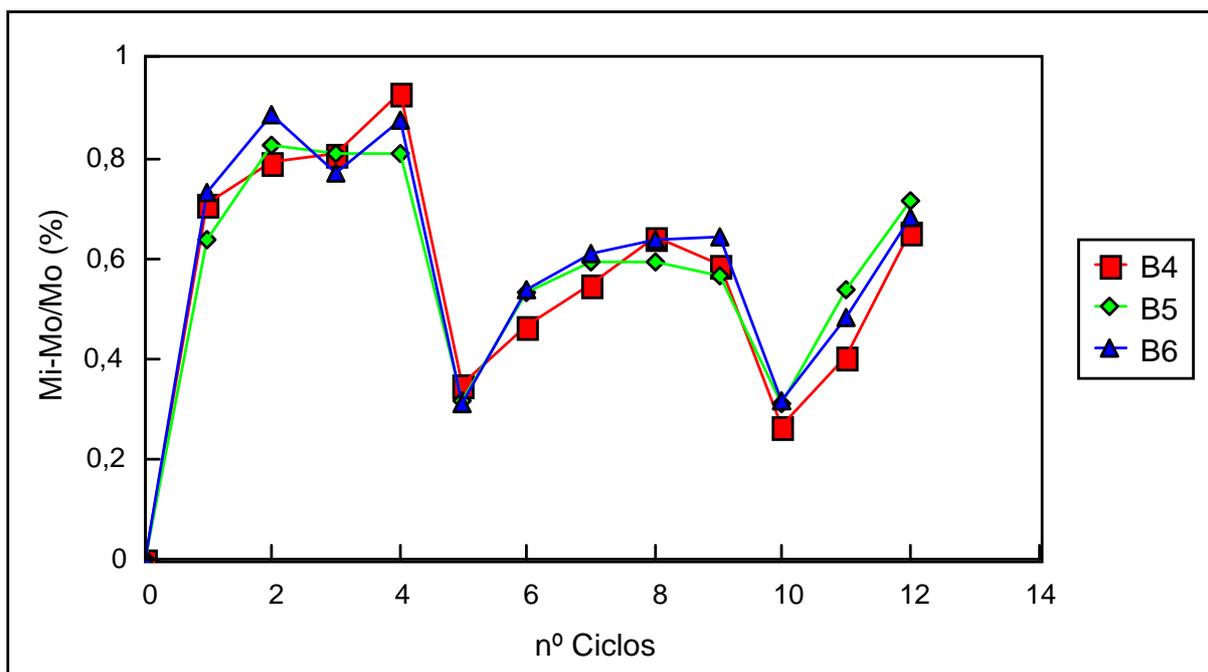


Figura 20. Cristalización de sales de la Arenisca de Durango.

## 4.5 Arenisca de Begoña

### 4.5.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 5 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
C	14,84	6,51	1,19	38,24	73,90	174,30

**Tabla 5.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Begoña (C).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v'$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Es una roca porosa, que absorbe una cantidad de agua moderada.

La dinámica de succión de agua por capilaridad en las tres muestras ensayadas es lenta, aunque se observa una dispersión considerable (c.A.C. entre 0,63 y 1,82 Kg/(m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>)) (ver figura 21).

Tras la desorción (12 días) las probetas retienen bastante agua absorbida en condiciones de vacío (ver figura 22).

Las probetas absorben agua a una velocidad moderada en condiciones ambientales; transcurridas 48 horas de absorción libre adquieren un grado de saturación superior al 64% (ver figura 23).

La permeabilidad al vapor de agua es elevada (ver figura 24).

El movimiento de agua por la red porosa de esta roca es lento; posiblemente este efecto sea debido a que la porosidad sea de pequeño diámetro y esté mal comunicada.

### 4.5.2 Envejecimiento artificial acelerado

En la figura 25 se observa la variación de masa experimentada por las probetas a lo largo de los 12 ciclos.

La pérdida de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 0,63%.

A partir del 8º ciclo se inicia una arenización, marcándose los niveles con granulometría más fina, generando una erosión diferencial (ver fotos 23 y 24).

### 4.5.3 Comentario

La disposición estratigráfica de esta roca, en la que quedan bien diferenciados unos niveles de otros por la acumulación de partículas más finas, condiciona el movimiento del agua a través de su red porosa; las fuerzas mecánicas generadas en la cristalización de sales en estas zonas actúan más intensamente, produciendo una erosión diferencial moderada.



Foto 23. Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña.

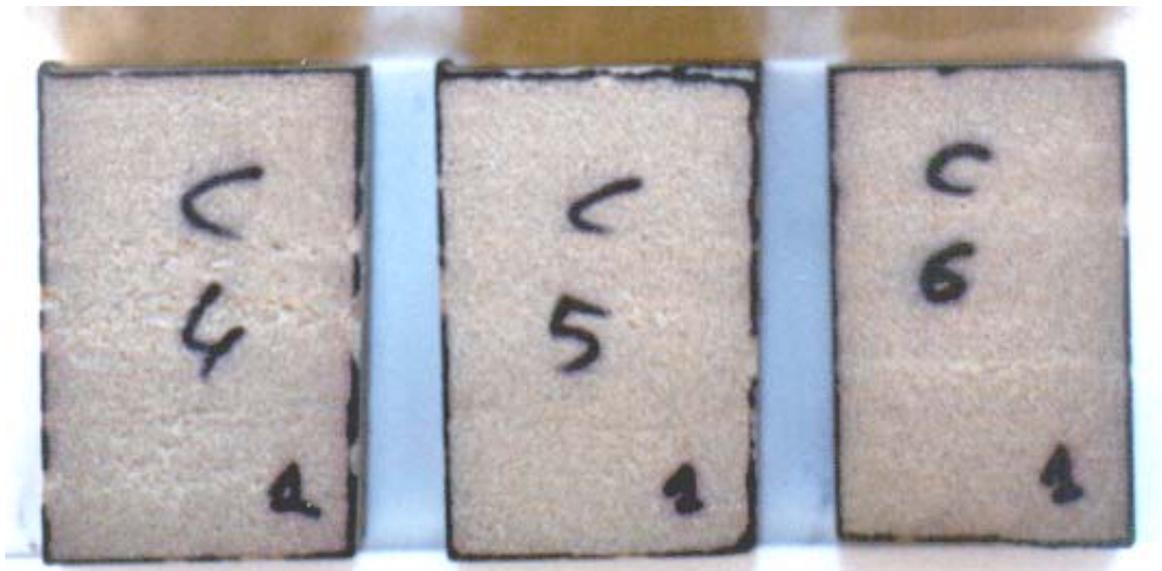


Foto 24. Probetas envejecidas de la Arenisca de Begoña.

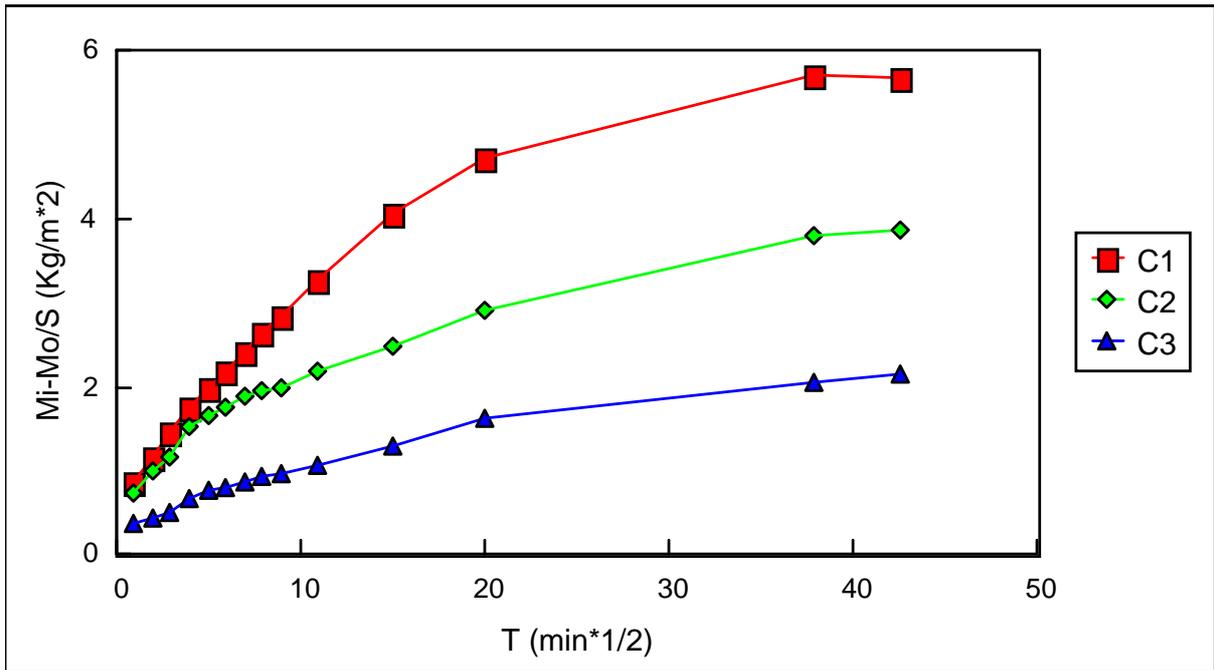


Figura 21. Succión capilar de la Arenisca de Begoña.

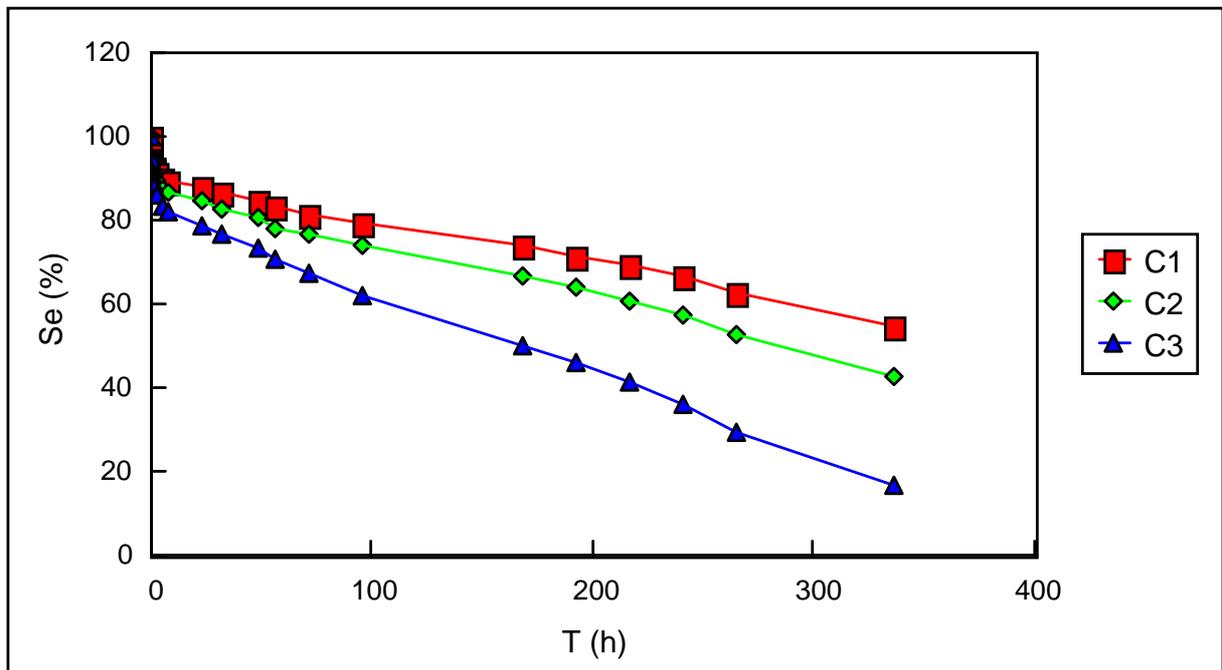


Figura 22. Desorción de la Arenisca de Begoña.

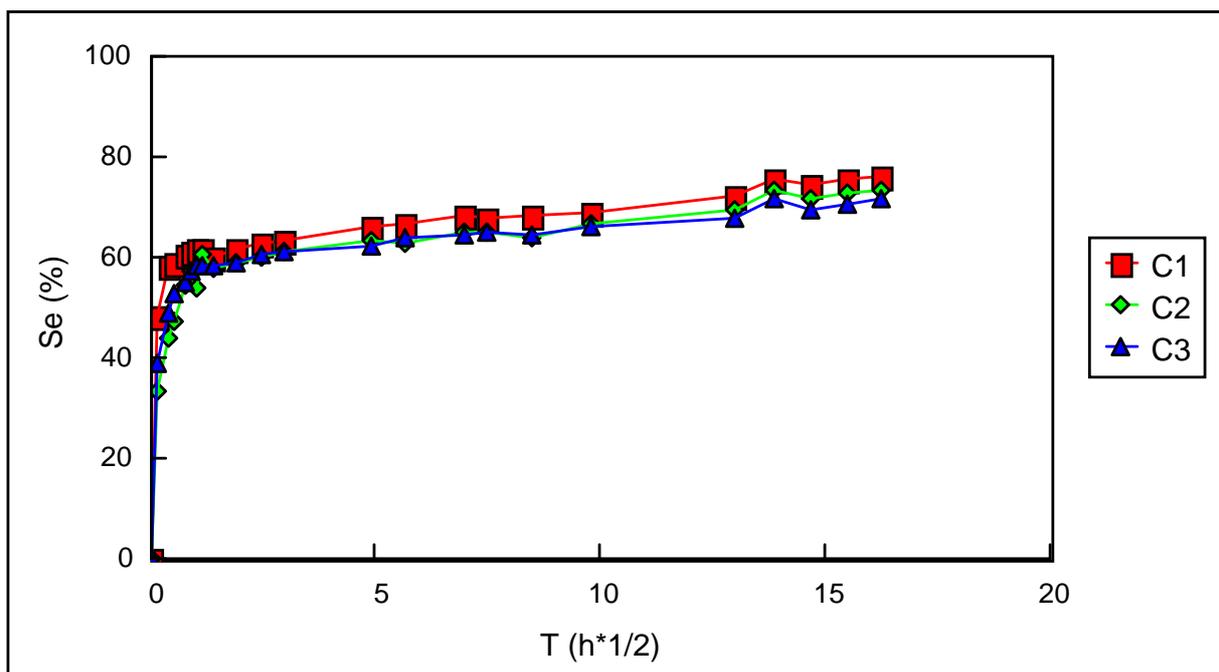


Figura 23. Absorción libre de la Arenisca de Begoña.

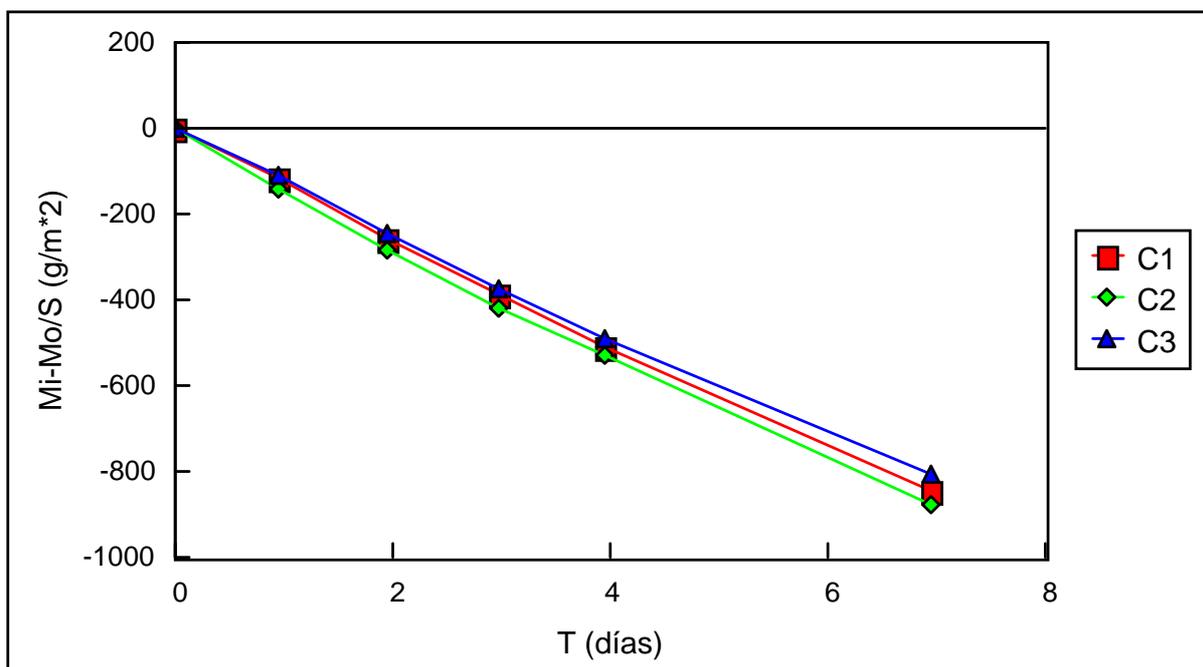


Figura 24. Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Begoña.

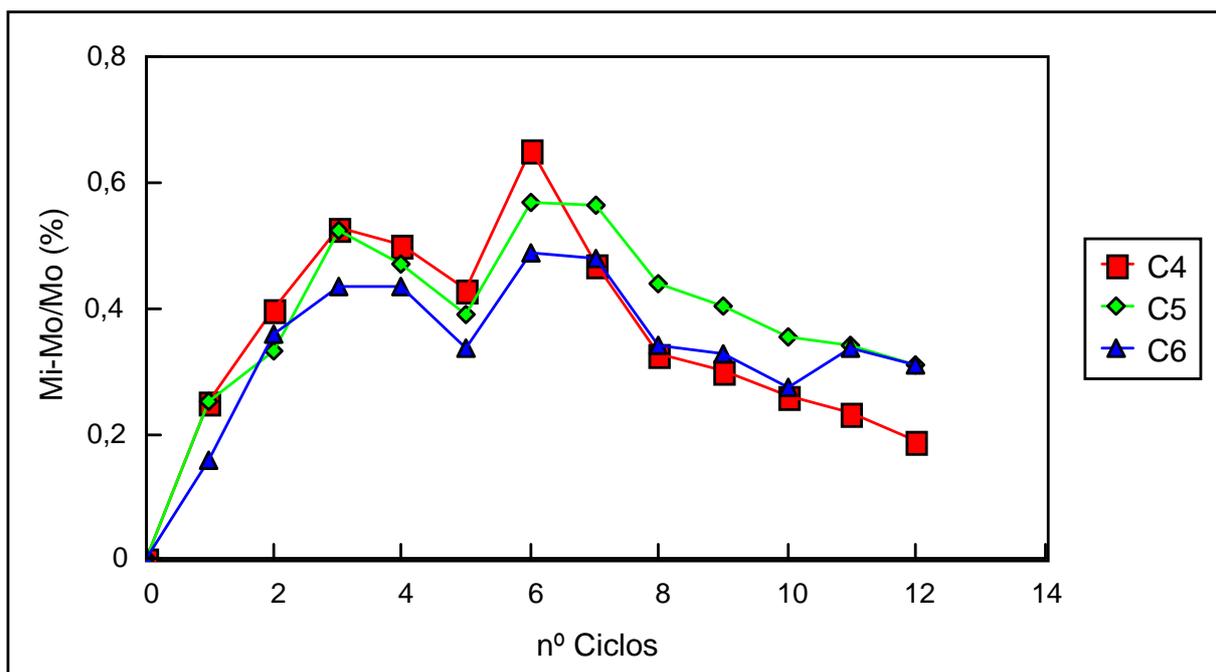


Figura 25. Cristalización de sales de la Arenisca de Begoña.

## 4.6 Arenisca de Montjuïc

### 4.6.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 6 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
Mo	17,79	8,34	4,28	3,51	72,57	72

**Tabla 6.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Montjuïc (Mo).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v'$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Es una roca porosa, que succiona agua rápidamente (ver figura 26).

Tras la desorción (12 días) las probetas retienen poca agua absorbida en condiciones de vacío (ver figura 27).

Las probetas absorben agua a una velocidad moderada en condiciones ambientales; transcurridas 48 horas de absorción libre adquieren un grado de saturación superior al 63% (ver figura 28).

La permeabilidad al vapor de agua es baja (ver figura 29).

La movilidad del agua por la red porosa de esta roca está condicionada por una porosidad que parece estar bien comunicada, ya que no se producen retenciones importantes de agua, y la velocidad de succión y absorción son moderadas.

### 4.6.2 Envejecimiento artificial acelerado

#### 4.6.2.1 Cristalización de sulfato sódico

En la figura 30 se observa la variación de masa experimentada por las probetas a lo largo de los 12 ciclos.

La pérdida de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 0,12%.

Como signos de alteración sólo se observa una ligera picadura en algunas caras a partir del ciclo 5 y una coloración rojiza en algunos niveles de estratificación (ver fotos 25 y 26).

#### 4.6.2.2 Hielo – deshielo

La pérdida de masa al finalizar los 25 ciclos del ensayo es de un 0,07%, y no se observa ningún tipo de alteración, a excepción de una ligera coloración rojiza en algunos niveles de estratificación (ver fotos 27 y 28).

### 4.6.3 Comentario

La composición mineralógica de esta roca, su elevado grado de cementación, así como su distribución porosa, la hacen resistente a la acción mecánica de la cristalización tanto de sales solubles como del agua.

Cabe remarcar que el cemento ferruginoso que contiene esta roca se oxida cuando el agua absorbida se pone en contacto con el mismo.

En los últimos cinco años la autora ha colaborado en diversos trabajos fin de carrera de la licenciatura de Arquitectura Técnica de la UPC, realizando la diagnosis de diversos edificios de la provincia de Barcelona construidos con arenisca de Montjuïc (claustro e iglesia de Santa Ana, Iglesia de Santa María del Pi, Museo de Geología, Sant Pere de les Puelles, etc.) quedando de manifiesto que este tipo de roca no es muy alterable, y que las principales formas de alteración son la formación de costras negras y la generación de pátinas de rubefacción asociadas a una limpieza de la roca con agua a presión.

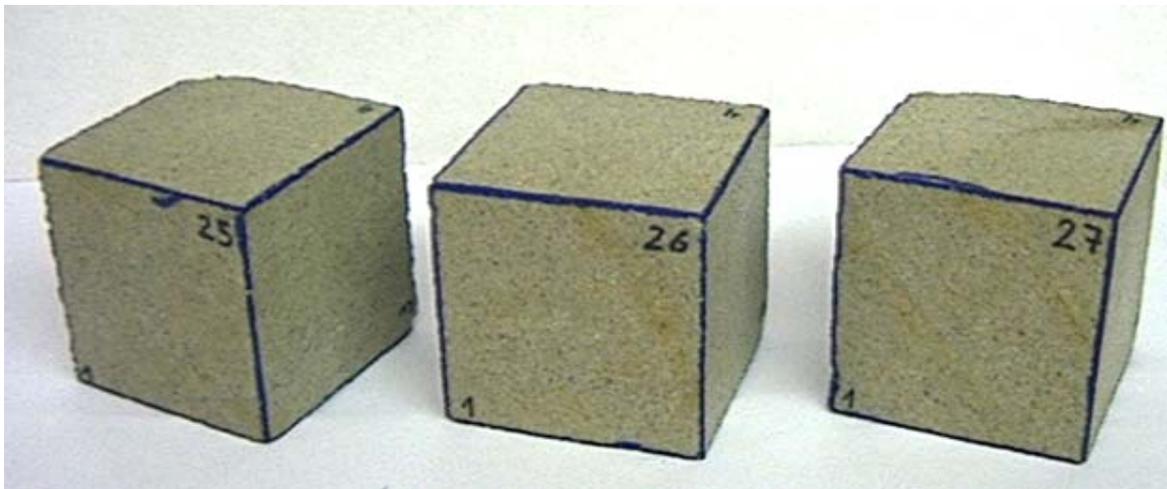


Foto 25. Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Montjuïc.

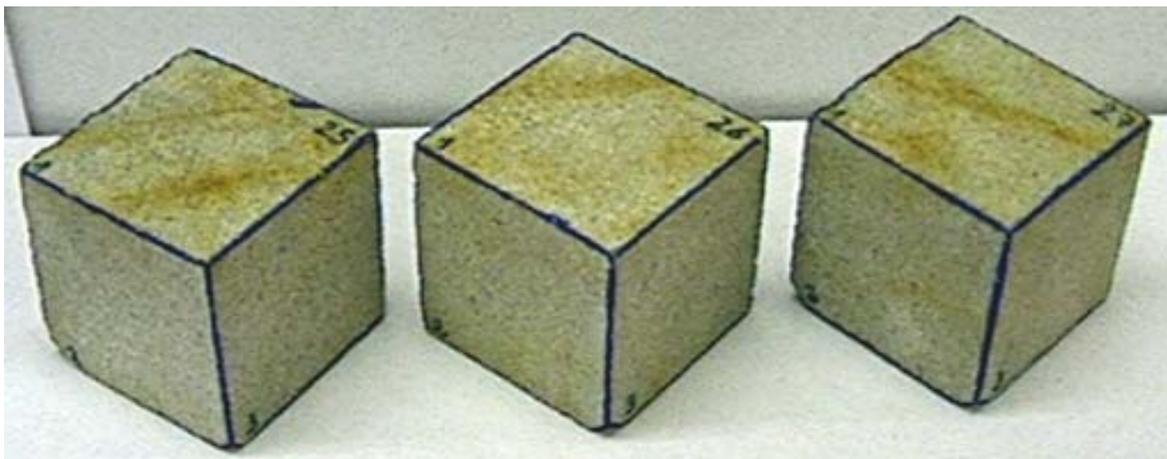
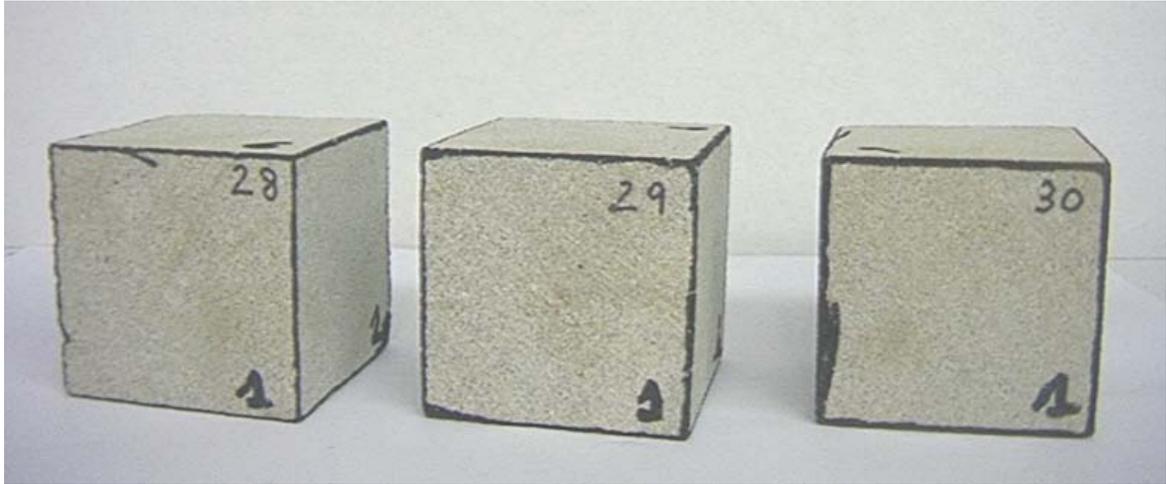
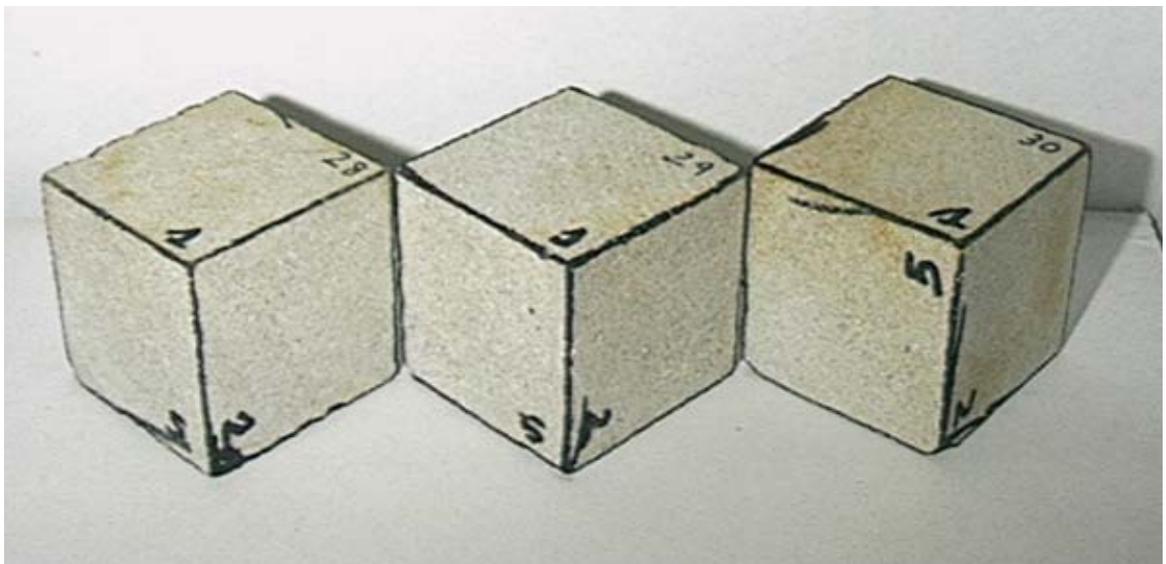


Foto 26. Probetas envejecidas, por cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 27.** Probetas antes de ser envejecidas de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 28.** Probetas envejecidas, por hielo - deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.

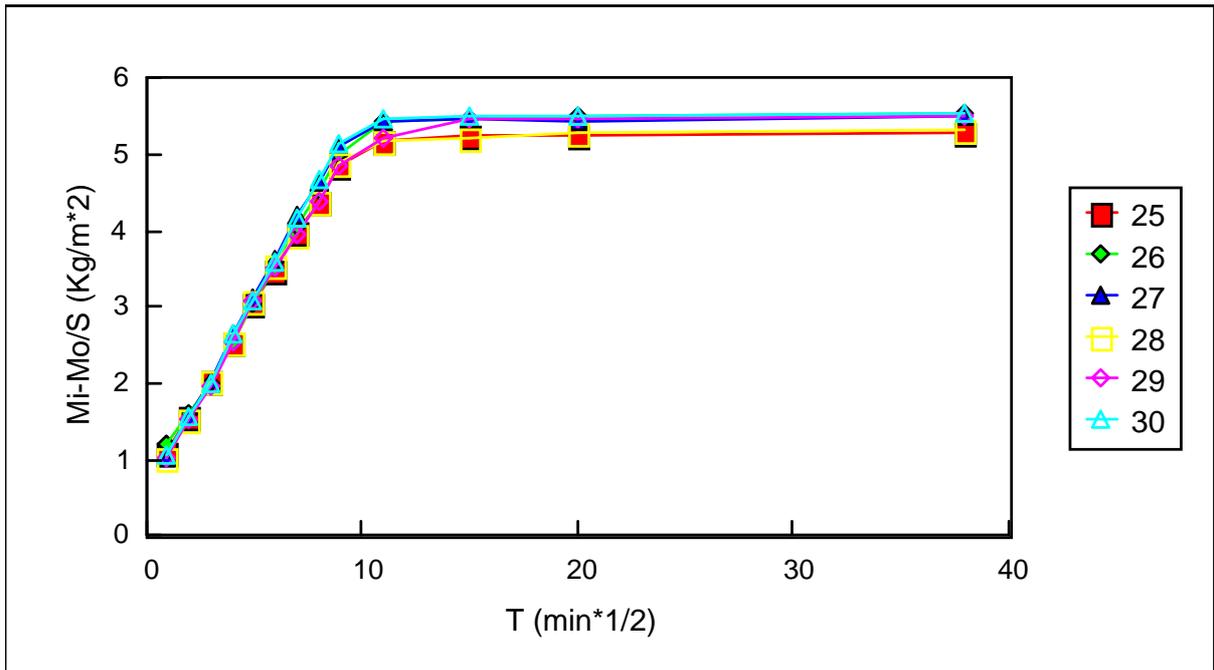


Figura 26. Succión capilar de la Arenisca de Montjuic.

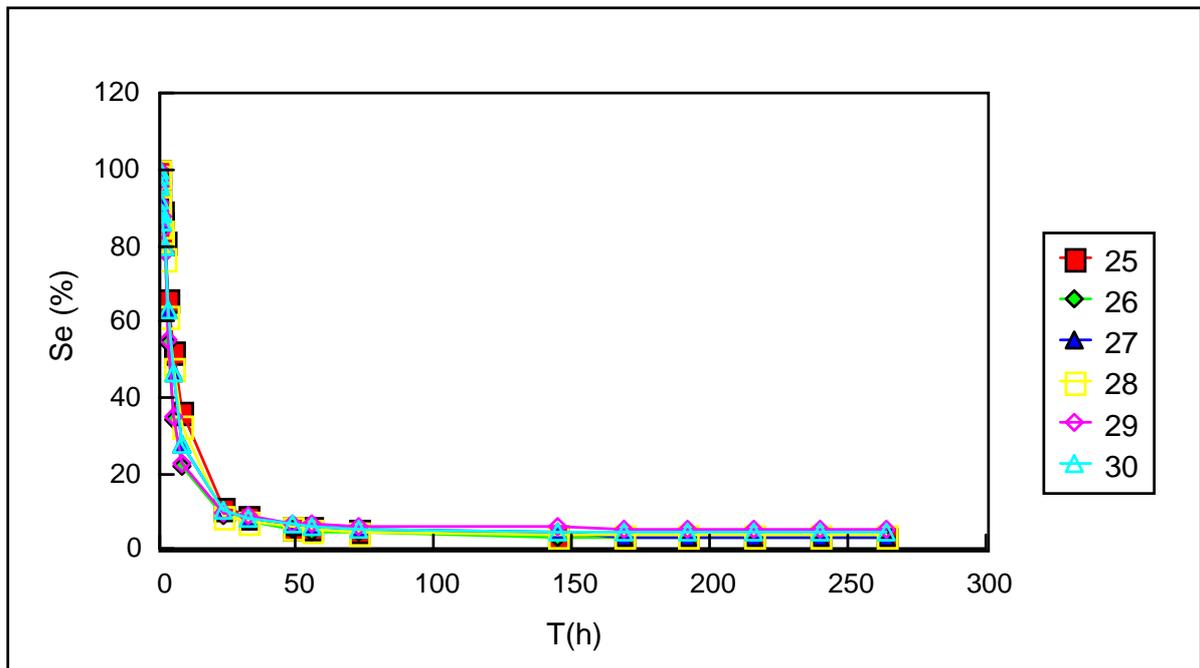


Figura 27. Desorción de la Arenisca de Montjuic.

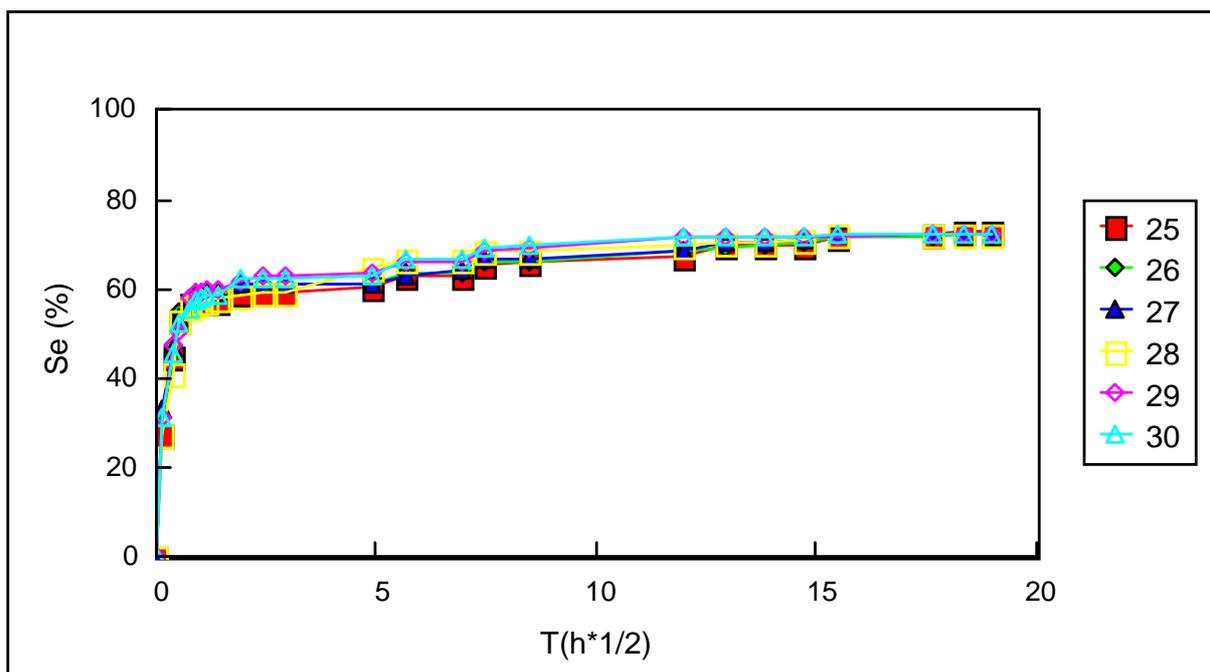


Figura 28. Absorción libre de la Arenisca de Montjuïc.

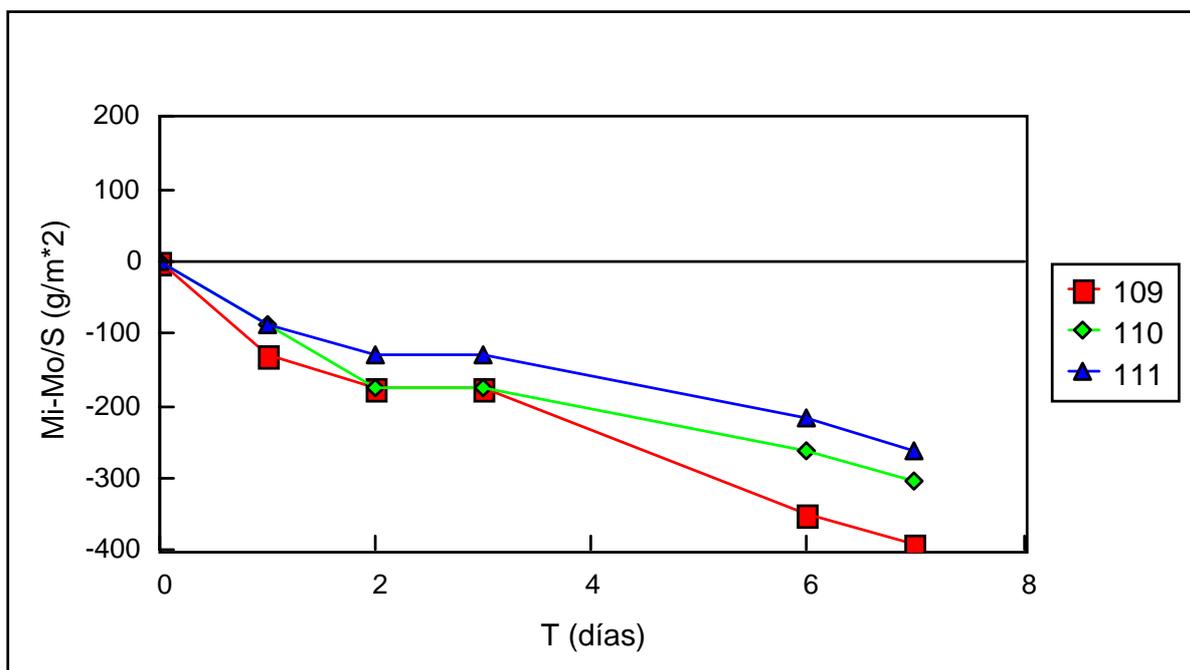


Figura 29. Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Montjuïc.

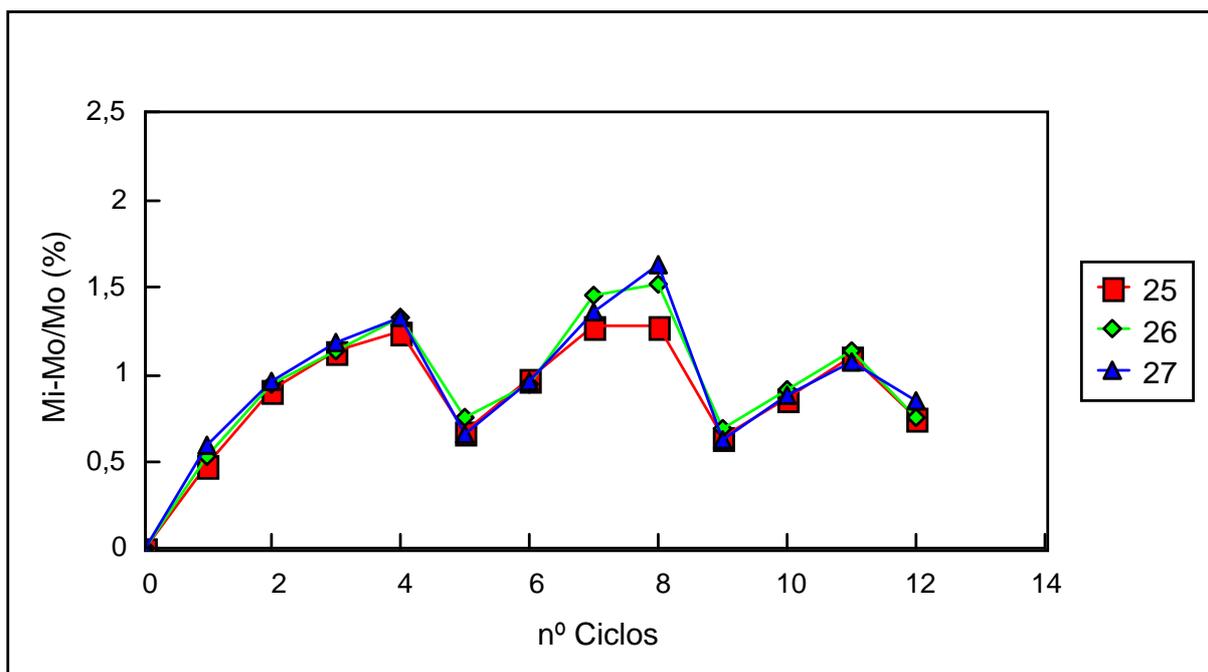


Figura 30. Cristalización de sales de la Arenisca de Montjuic.

## 4.7 Parrot's Mix nº4

### 4.7.1 Caracterización petrofísica

En la Tabla 7 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca artificial.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m h <sup>2,1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
M	47,49	64,04	0,22	35,00	48,00	58,96

**Tabla 7.** Propiedades petrofísicas de Parrot's Mix nº4 (M).

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor.

Parrot's Mix nº4 es un material de una porosidad abierta muy elevada, gran capacidad de absorción de agua en saturación y una velocidad de succión capilar muy baja (ver figura 31). Tras la desorción (12 días) las probetas retienen menos del 35% del agua absorbida en condiciones de vacío (ver figura 32).

Las probetas absorben agua a una velocidad lenta en condiciones ambientales; transcurridas 48 horas de absorción libre tan sólo han adquirido un grado de saturación superior al 40% (ver figura 33).

La permeabilidad al vapor de agua es muy baja (ver figura 34).

La red porosa de esta roca está condicionada por la existencia de esférulas en su composición, con paredes muy porosas, pero de radio de acceso muy pequeño. La distribución porosa está formada por canales bien comunicados, los existentes en el aglutinante, y cuellos de botella muy estrechos que comunican con sacos ciegos, las esférulas.

De esta forma se entiende que el movimiento del agua por la red porosa de esta roca artificial sea tan lento.

### 4.7.2 Envejecimiento artificial acelerado

El ensayo, para este tipo de material y dado que al finalizar los 12 ciclos no se observó ningún síntoma de alteración, se ha prolongado durante 18 ciclos; en la figura 35 se observa la variación de masa experimentada.

Al finalizar los 18 ciclos se aprecia una ligera arenización y una muy incipiente fisuración (ver fotos 29 y 30).

La ganancia de masa obtenida al finalizar el ensayo es de 4,97%.

Una observación a microscopio electrónico de barrido pone de manifiesto que esta ganancia de masa es debida a que la sal utilizada en este ensayo se va acumulando en las esferas, llegando a llenarlas por completo y finalizando con la eclosión de éstas; pero este proceso es lento (Navarro Ezquerro, A. 1993).

#### 4.7.3 Comentario

Una vez transcurridos 28 días desde el momento de su confección, la composición global de este material, sobre todo la presencia de las esférulas, así como su distribución porosa hacen que sea especial, ya que la movilidad del agua por su interior es muy lenta y las presiones mecánicas ejercidas por la cristalización de sales son absorbidas, sin generar lesiones al propio material hasta que las esférulas están completamente llenas.

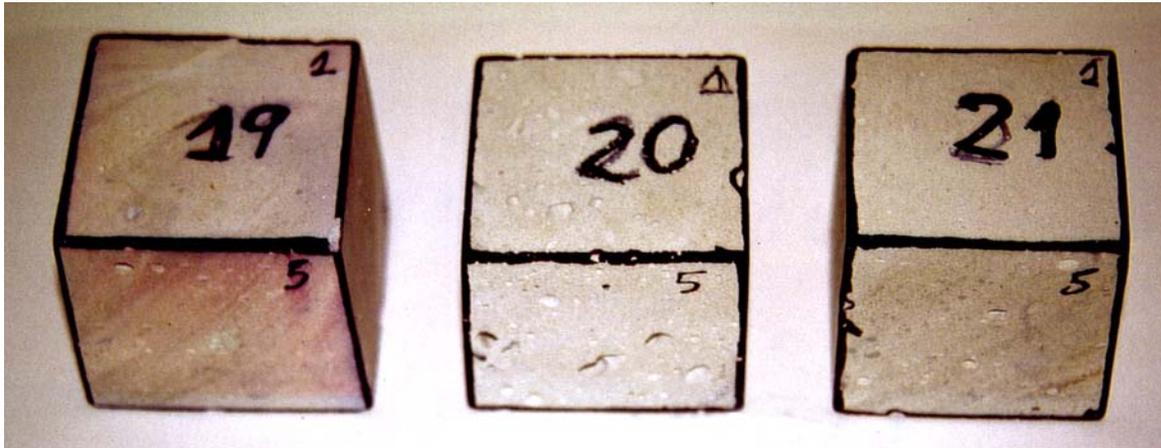


Foto 29. Probetas antes de ser envejecidas de Parrot's Mix 4.

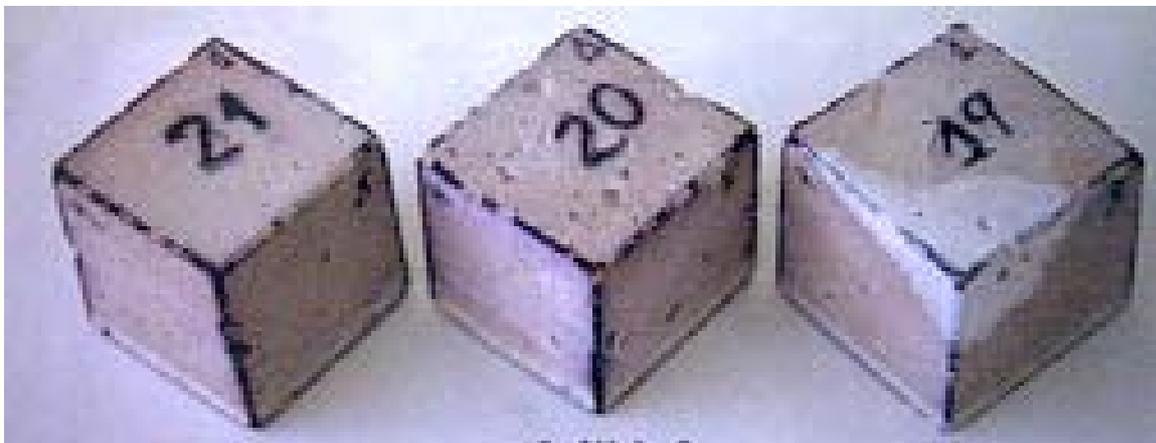


Foto 30. Probetas envejecidas de Parrot's Mix 4.

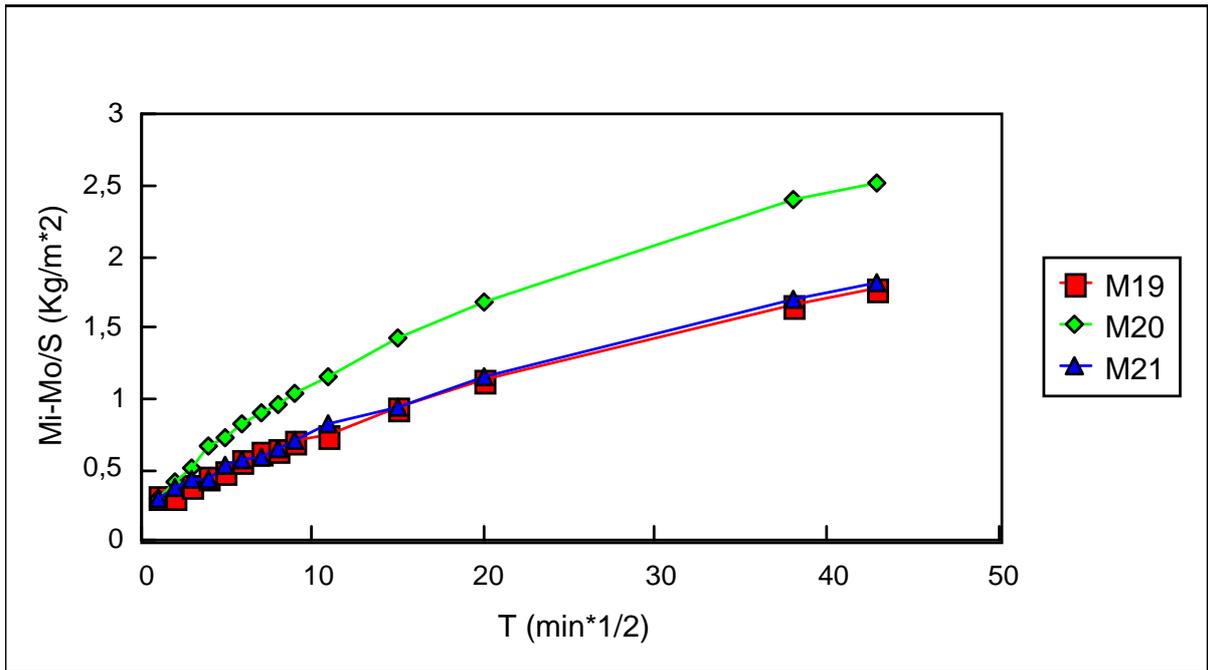


Figura 31. Succión capilar de Parrot's Mix n°4.

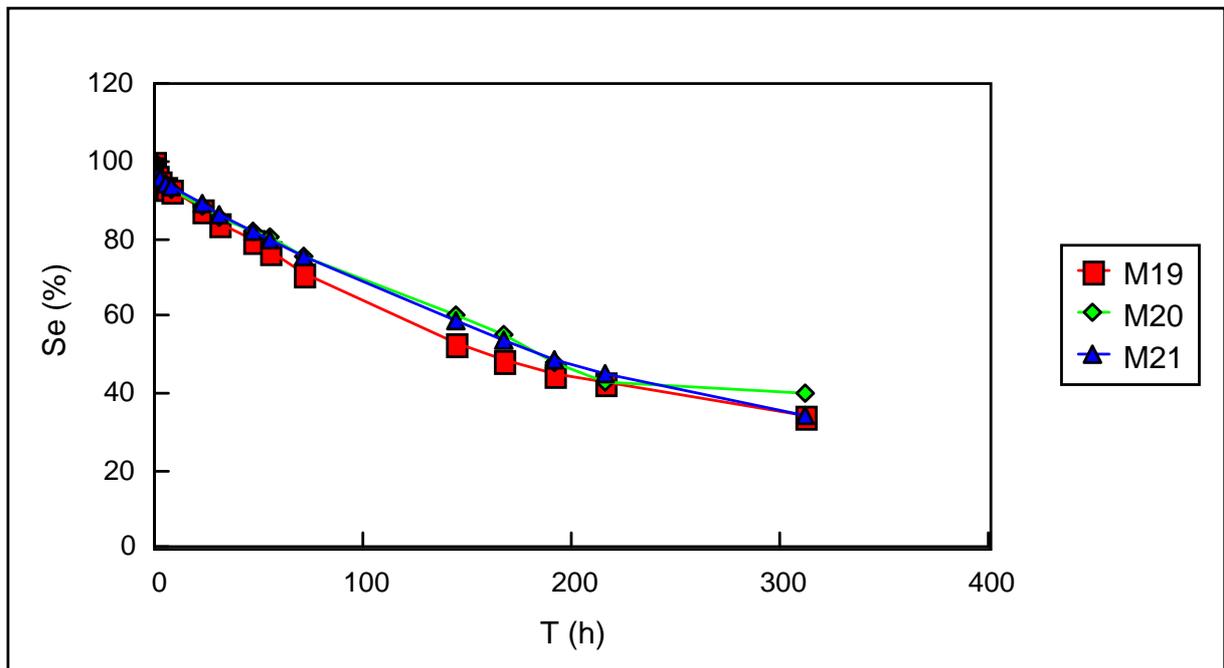


Figura 32. Desorción de Parrot's Mix n°4.

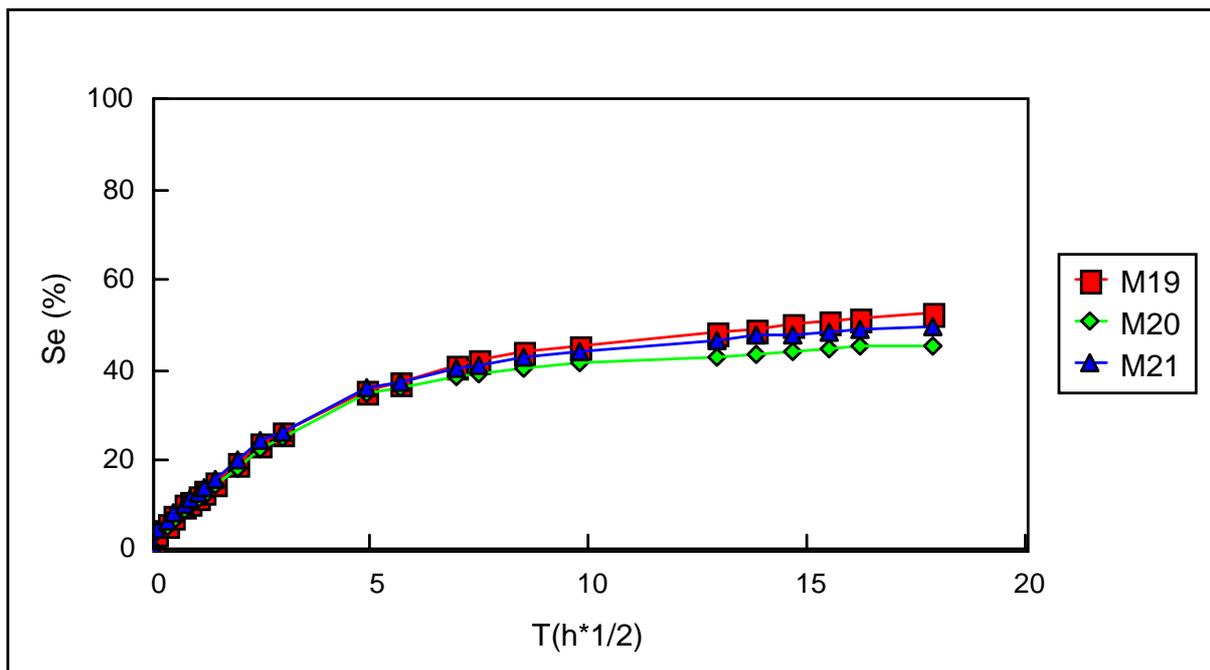


Figura 33. Absorción libre de Parrot's Mix n°4.

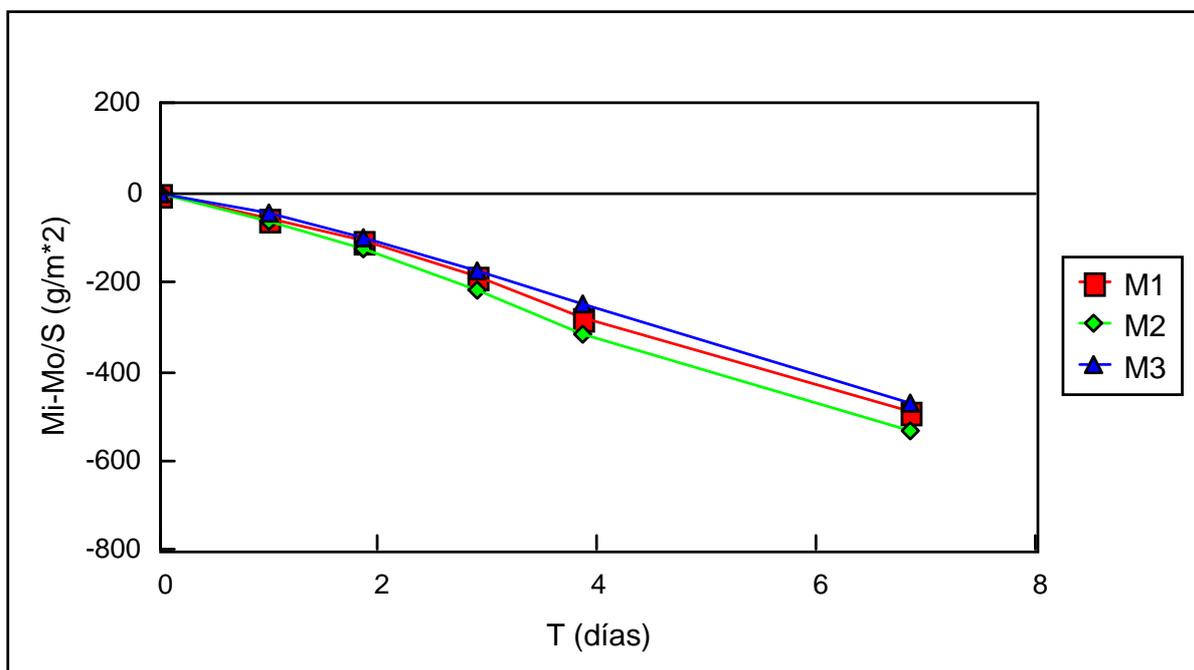


Figura 34. Permeabilidad al vapor de agua de Parrot's Mix n°4.

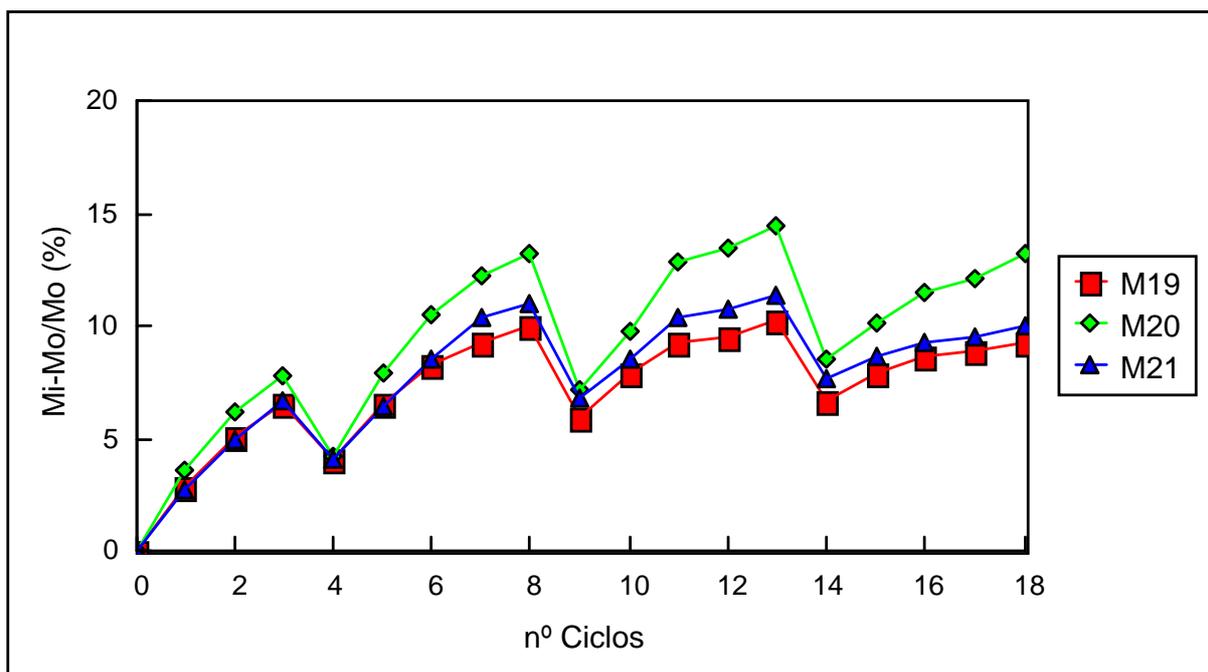


Figura 35. Cristalización de sales de Parrot's Mix n°4.

## 4.8 RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA Y ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO

En la tabla 8 se resume la caracterización petrofísica de los diferentes tipos de roca estudiados, así como la variación de masa que han experimentado al finalizar el ensayo de envejecimiento artificial acelerado por cristalización de sales:

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$K_v'$ ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ )	$\Delta m$ (%)
<b>F</b>	9,89	4,08	0,93	5,00	80,00	107,20	-0,64
<b>L</b>	32,02	17,47	11,73	58,02	83,21	241,64	-30,82
<b>A</b>	22,24	10,54	4,68	32,65	79,32	124,62	-0,51
<b>B</b>	10,29	4,24	1,35	52,09	82,49	76,50	-0,58
<b>C</b>	14,84	6,51	1,19	38,24	73,90	174,30	-0,63
<b>Mo</b>	17,79	8,34	4,28	3,51	72,57	72	-0,12
<b>M</b>	47,49	64,04	0,22	35,00	48,00	58,96	4,97

**Tabla 8.** Propiedades petrofísicas de los siete tipos de roca estudiados.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbido; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $K_v'$ : Coeficiente de permeabilidad, corregido el espesor;  $\Delta m$ : variación de masa al finalizar el ensayo de cristalización de sales. F: Arenisca del Figaró; L: Calcilitita del Lorito; A: Caliza de Hontoria; B: Arenisca de Durango; C: Arenisca de Begoña; Mo: Arenisca de Montjuïc; M: Parrot's Mix n°4.

- De todas las rocas estudiadas en este trabajo, la roca más porosa y la que absorbe mayor cantidad de agua en condiciones de vacío es la artificial Parrot's Mix n°4.

- En cuanto a las rocas naturales, las que son carbonatadas (Calcilitita del Lorito y Caliza de Hontoria), tienen una mayor porosidad y absorben mayor cantidad de agua.

- La roca que presenta mayor coeficiente de absorción capilar es la Calcilitita del Lorito, dando un valor muy superior al resto de rocas estudiadas.

La piedra artificial, curiosamente, es la que presenta una succión capilar muy lenta, siendo la más lenta de todas las rocas estudiadas.

- La roca que retiene más agua al finalizar el ensayo de desorción es la Calcilitita del Lorito. La que menos agua retiene es la Arenisca de Montjuïc.

- La piedra artificial es la que se satura, en condiciones ambientales, más lentamente, sin conseguir llegar a un 50% al finalizar el ensayo.

- La roca más permeable al vapor de agua es la Calcilita del Lorito; en contraposición, la menos permeable es la piedra artificial.

- La roca que más se altera con el ensayo artificial acelerado de cristalización de sales es la Calcilita del Lorito, llegando a perder un 30% de su masa al finalizar el ensayo. La piedra artificial no sólo no pierde masa, sino que acumula en su interior sales utilizadas en el ensayo.

## 5 TRATAMIENTO DE LAS ROCAS

Los productos que se han ensayado son de la marca Pinturas Parrot (Akzo Nobel), y de la empresa Th. Goldsmicht.

El silicato de etilo, que la primera marca comercializa con el nombre de "Consistone FS dos componentes", ya fue estudiado en la arenisca del Figaró y en el mortero Parrot's Mix nº4 por esta autora en su tesis de licenciatura (Navarro Ezquerro, A. 1993).

Este mismo producto también ha sido probado en la calcilutita del Lorito en trabajos experimentales sobre la Muralla de Tarragona (Bermúdez, A.; Arroyo, P. et. al. 1992), obteniéndose resultados nada satisfactorios.

La caliza de Hontoria también ha sido tratada con silicato de etilo, y estudiado su comportamiento en el Departamento de Geología (Petrología) de la Universidad de Oviedo (Esbert, R.M.; Díaz-Pache, F. 1993).

En esta tesis se ha tratado la caliza de Hontoria y las areniscas de Durango y Begoña con los productos Consistone A y Plurifach P como consolidantes porque en el País Vasco, lugar donde hay bastantes construcciones con estos tipos de roca, se utilizan con asiduidad estos productos.

Así mismo, y de forma comparativa, la arenisca del Figaró, la calcilutita del Lorito y el Mix nº 4 se han tratado con estos mismos productos.

Además, la arenisca de Montjuïc se ha tratado con el silicato de etilo de las dos marcas indicadas porque es uno de los productos más utilizados en Barcelona como consolidante. En este comparativo se pretende observar si las modificaciones que se han introducido en el Consistone FS mejoran las prestaciones del silicato de etilo sin modificar, composición del Tegovakón V. También se ha querido hacer un comparativo entre el Consistone A de la primera marca mencionada con los dos silicatos de etilo, para observar si mejora las prestaciones que estos ofrecen a este tipo de roca.

Por las razones aquí expuestas se ha decidido basar el estudio de los seis tipos de roca natural y del mortero Parrot's Mix nº4 con estos productos, cuya naturaleza se describe a continuación (datos facilitados por las empresas suministradoras):

- Consistone A: Copolimerizado de un alcoxi-siloxano hidrolizable acrílico, de carácter consolidante e hidrofugante a la vez. Se especificará con las siglas CA.
- Plurifach P: Resina acrílica, también de carácter consolidante e hidrofugante. Se especificará con las siglas PP.
- Consistone FS dos componentes: Silicato de etilo modificado, de carácter consolidante. Se especificará con las siglas CF.
- Parrogum Invisible: Alcoxi-alquil-siloxano modificado con una base hidrofugante organomineral, de carácter hidrofugante. Se especificará con las siglas PI.

- Tegovakon V: Silicato de etilo, de carácter consolidante. Se especificará con las siglas TV.
- Tegosivin HL100: Metiletoxipolisiloxano, de carácter hidrofugante. Se especificará con las siglas TC.

Se han contemplado dos casos en cuanto a la metodología de aplicación de los tratamientos:

- Probetas pintadas con pincel, hasta saturación, por las 6 caras con un producto consolidante y posteriormente con el hidrofugante (Consistone A y Parrogum Invisible; Plurifach P y Parrogum Invisible) para el caso de la arenisca del Figaró y la calcilita del Lorito.
- Probetas pintadas con pincel, hasta saturación, por 4 caras, paralelas dos a dos, con los mismos pares de productos que en el caso anterior, para los 5 tipos de rocas estudiados y el mortero artificial Parrot's Mix nº4. La arenisca de Montjuïc se ha tratado con los siguientes productos: Consistone FS y Parrogum Invisible; Consistone A y Parrogum Invisible; y Tegovakon V y Tegosivin HL100.

Primero se ha aplicado el producto consolidante sobre las probetas y se ha dejado polimerizar durante una semana (según especificaciones técnicas de los productos) en condiciones ambientales y aislando las probetas de la luz.

Posteriormente se ha aplicado el hidrofugante y se ha dejado el mismo tiempo y en las mismas condiciones que en el caso del consolidante.

Aunque los dos primeros productos ensayados sean de carácter consolidante e hidrofugante a la vez, la hidropelencia que confieren a las superficies tratadas es mínima. Así pues, también se han tratado con el hidrofugante correspondiente.

Para determinar la variación de permeabilidad de las probetas tratadas con estos productos, se ha realizado el ensayo de permeabilidad al vapor de agua tratando las probetas con cada producto por separado, y comparando los valores obtenidos con los de las probetas sin tratar.

## 6 MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS Y VARIACIÓN PORCENTUAL DE MASA TRAS EL ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO, TRAS LA APLICACIÓN DE PRODUCTOS CONSERVATIVOS

### 6.1 Arenisca del Figaró

#### 6.1.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 9 se presentan los parámetros obtenidos de caracterización petrofísica y la variación porcentual de masa tras el envejecimiento artificial acelerado para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos, aplicados por 6 caras y por 4 caras.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ (%)
<b>F</b>	9,89	4,08	0,93	5,00	80,00	0,64
<b>FCAPI-6</b>	8,49	3,51	0,16	25,09	22,18	0,04
<b>FCAPI-4</b>	10,61	4,44	0,84	57,94	72,28	0,72
<b>FPPPI-6</b>	9,30	3,84	0,11	28,31	21,74	0,03
<b>FPPPI-4</b>	9,32	3,85	0,67	63,59	76,35	1,33

**Tabla 9.** Propiedades petrofísicas de la arenisca del Figaró (F) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI), por 6 y 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado.

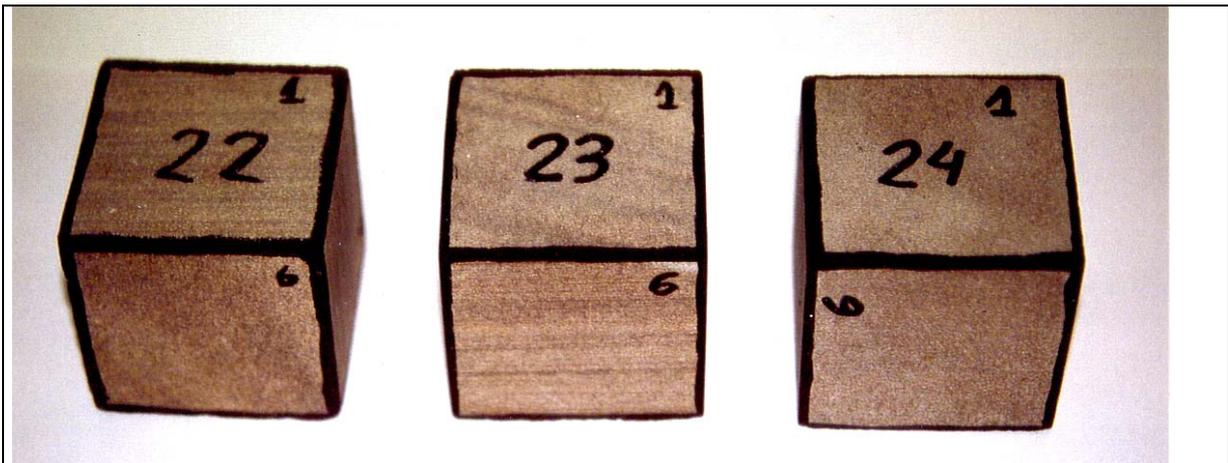
La porosidad de las probetas tratadas con CAPI por 6 caras se ha reducido un 14% respecto a las probetas sin tratar. En el caso de las probetas tratadas con PPPI, la porosidad se ha reducido sólo un 6% en las dos modalidades de aplicación. Cabe remarcar el caso anómalo de las probetas tratadas con CAPI por 4 caras, en las que la porosidad ha aumentado un 7%. La cantidad de agua absorbida por las probetas presenta la misma variación que en el caso de la porosidad.

El coeficiente de absorción capilar de probetas tratadas por 6 caras disminuye mucho, alrededor de un 85%, mientras que en el caso de las tratadas por 4 caras la disminución es mucho menor, en concreto un 28% menos para el tratamiento PPPI y un 9,6% para el CAPI (ver figuras 36 y 37).

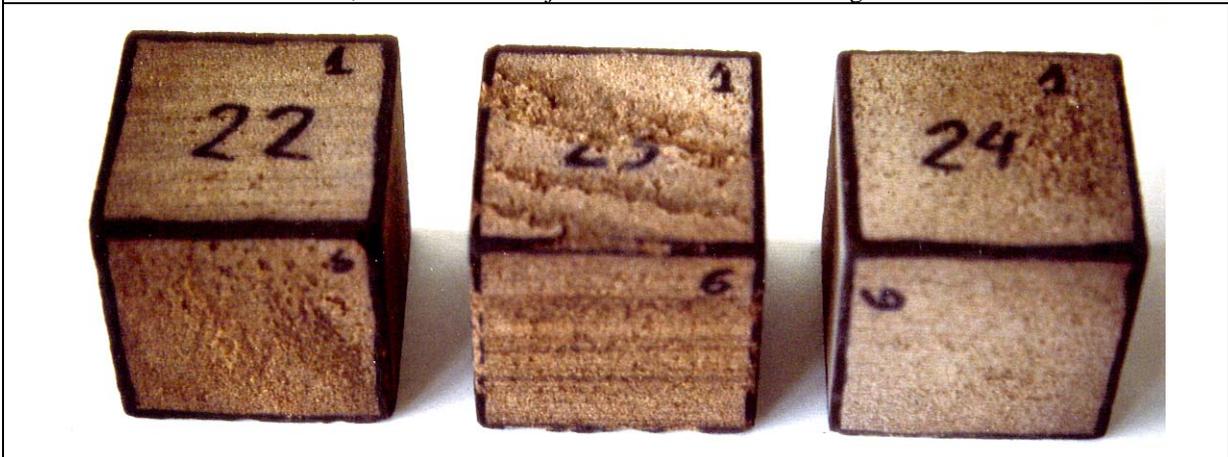
Las probetas sin tratar desorben mejor que las tratadas; además, las probetas tratadas por las 4 caras desorben peor que las tratadas por 6 caras (ver figuras 38 y 39), siendo las probetas tratadas con PPPI las que más agua retienen.

Tras 48 horas de absorción libre, las probetas tratadas por 4 caras han alcanzado grados de saturación ligeramente inferiores a los obtenidos por las probetas sin tratar, mientras que las probetas tratadas por 6 caras no han alcanzado grados de saturación superiores al 23% (ver figuras 40 y 41).

Una vez finalizado el ensayo de cristalización de sales, las probetas tratadas por 6 caras no han perdido casi masa, mientras que las probetas tratadas por 4 caras han perdido más masa que las probetas sin tratar (ver figuras 42 y 43) (ver fotos 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40), siendo las probetas tratadas con PPPI las que más masa pierden.



**Foto 31.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 32.** Probetas sin tratar, envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 33.** Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 34.** Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 35.** Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 36.** Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 37.** Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 38.** Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 39.** Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Arenisca del Figaró.



**Foto 40.** Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, envejecidas de la Arenisca del Figaró.

En la Tabla 9 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos. En la figura 44 se representan gráficamente estos valores.

	<b>Kv' (g/(m<sup>2</sup>*24h))</b>
<b>F</b>	107,20
<b>FCA</b>	99,76
<b>FPP</b>	81,64
<b>FPI</b>	110,25

**Tabla 10.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca del Figaró (F) tratada con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tratamientos de carácter consolidante han reducido el valor de la permeabilidad, posiblemente como consecuencia de una disminución de la porosidad de la roca. El tratamiento que menos ha modificado esta propiedad es el CA.

Las probetas tratadas con el producto de carácter puramente hidrofugante tienen un valor de permeabilidad muy similar a las probetas sin tratar, ya que es un tratamiento que no modifica excesivamente la porosidad de la roca. El ligero aumento de permeabilidad de la roca tratada puede estar ocasionado por esta modificación de la configuración de la red porosa, haciéndola más uniforme en los primeros milímetros, que es la profundidad de penetración de este producto.

### 6.1.2 Comentario

La aplicación de un determinado tratamiento sobre una probeta por todas sus caras modifica de forma muy significativa la movilidad del agua por su red porosa.

Todos los parámetros calculados dan valores inferiores en el caso de las probetas tratadas por las seis caras respecto a las probetas sin tratar y a las probetas tratadas por cuatro caras.

Esta forma de aplicar el producto confiere una menor porosidad al conjunto. Además condiciona una menor entrada de agua en la red porosa de la roca. También retrasa la evaporación de la misma. Así pues, si es difícil el acceso del agua al interior de la roca, las sales solubles que utilizan como medio de transporte el agua, también tendrán dificultada su entrada, y su efecto disruptivo será menor por el hecho que habrá menos sales en el interior de la roca.

En cuanto a las probetas tratadas por cuatro caras, el valor del parámetro que más ha variado es el grado de saturación al finalizar la desorción, siendo las probetas así tratadas las que retienen durante más tiempo el agua absorbida.

Las sales solubles, al cristalizar, ejercen mayor presión en la interfase entre la roca sin tratar y la zona tratada, y es en esta zona a partir de la cual la erosión de este material se inicia.

El tratamiento que menos modifica las propiedades petrofísicas de esta arenisca es el Consistone A y Parrogum Invisible, aplicado por 4 caras.

Además, el envejecimiento de la roca tratada con estos productos es similar al de la roca sin tratar, aunque en la zona de la interfase se aprecia una arenización incipiente.

Esta roca tratada con el producto de carácter hidrofugante es permeable al vapor de agua, ya que su permeabilidad es similar a la roca sin tratar.

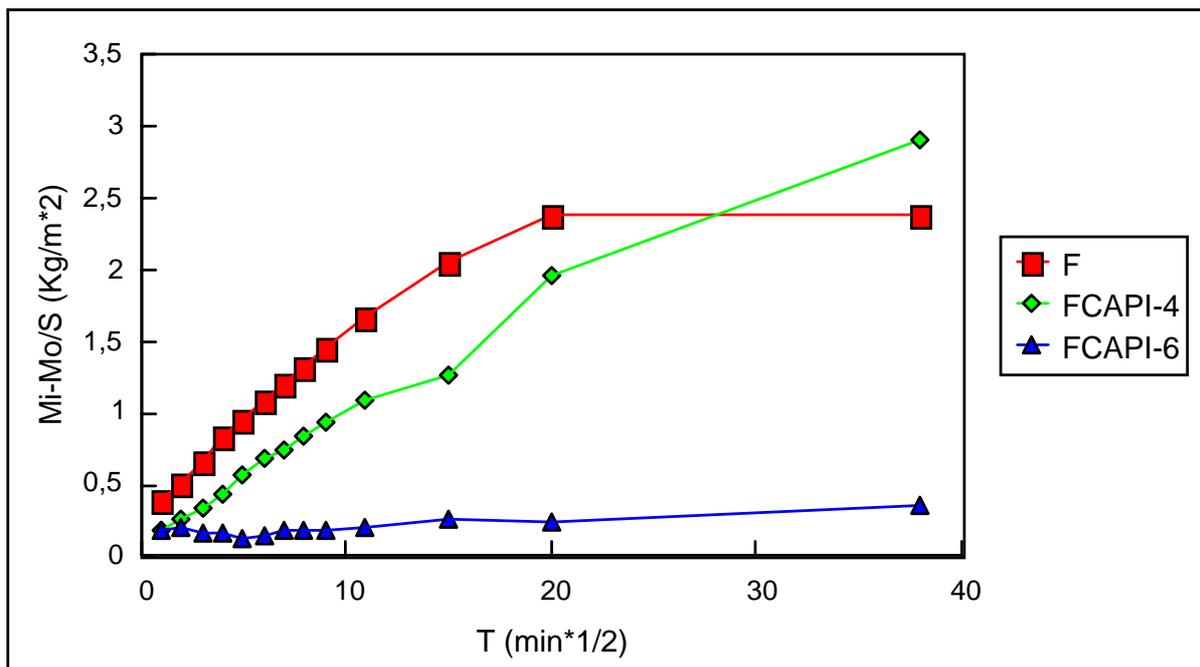


Figura 36. Succión capilar de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.

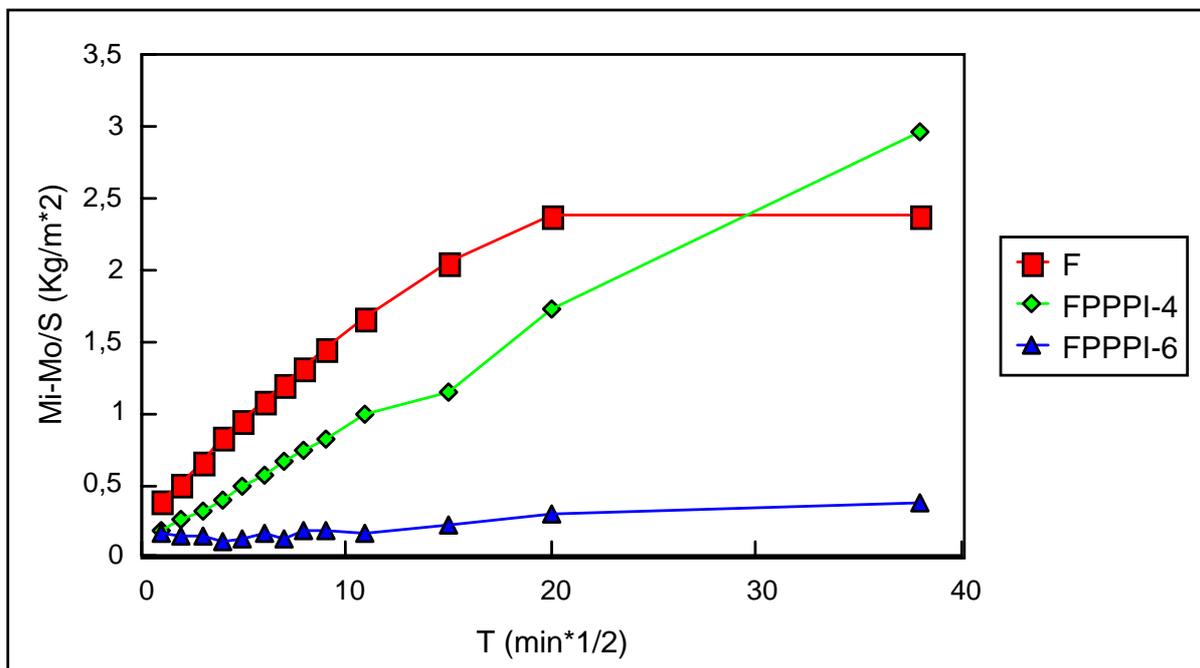
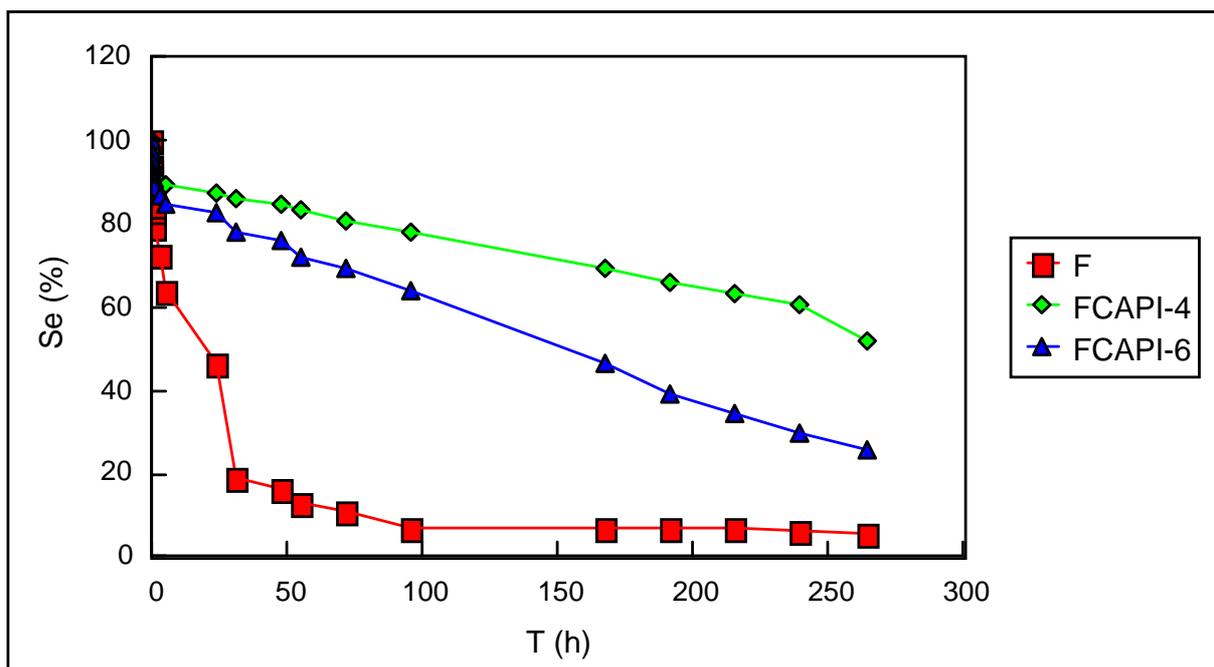
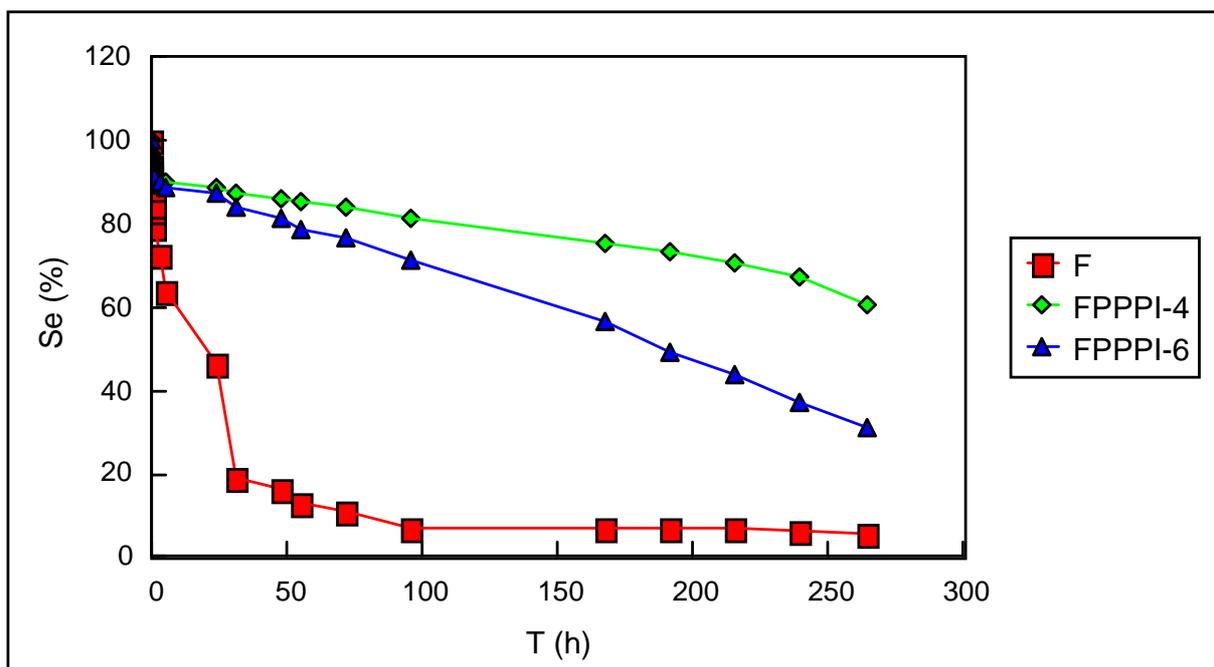


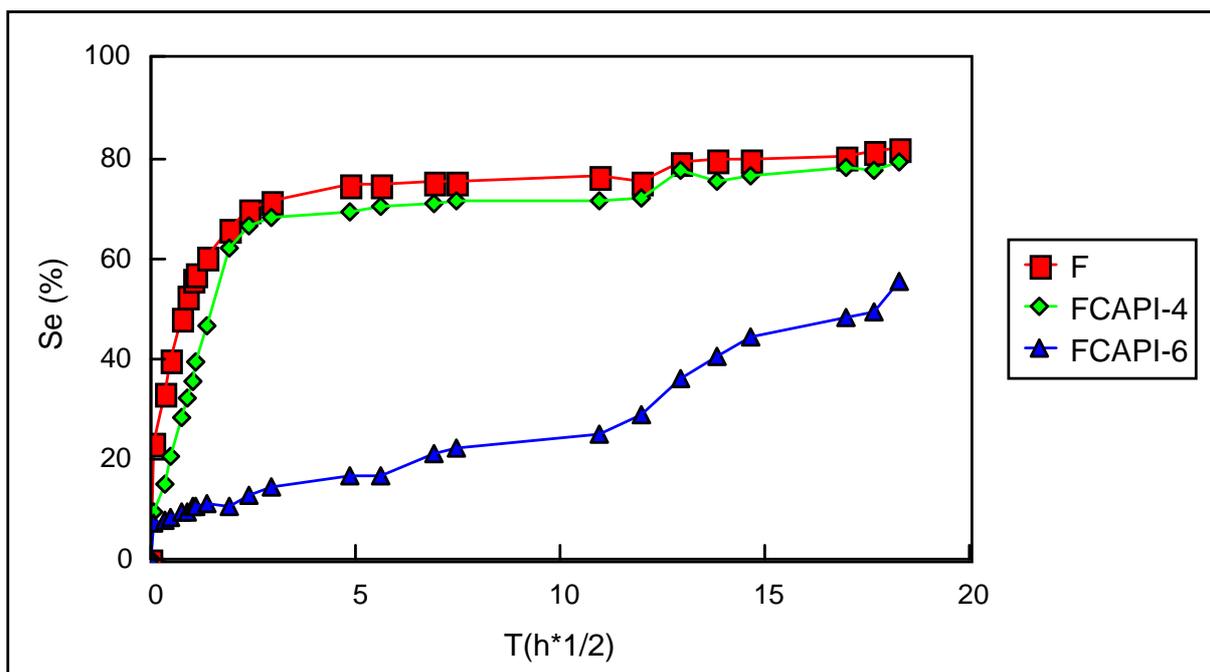
Figura 37. Succión capilar de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



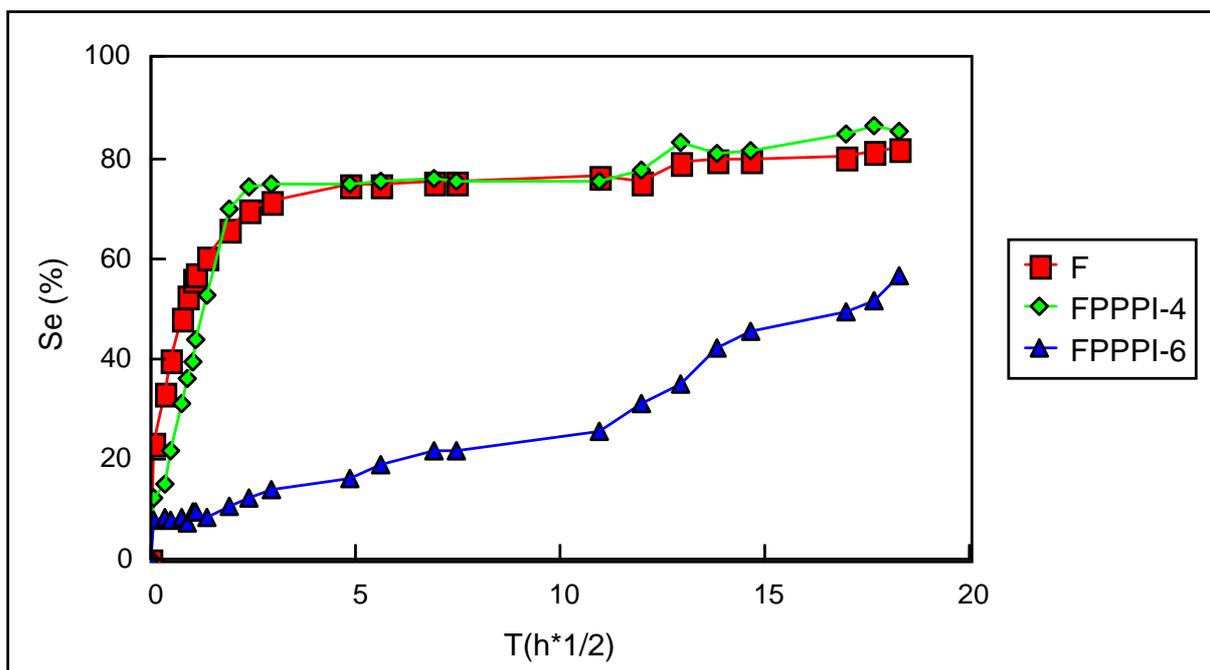
**Figura 38.** Desorción de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.



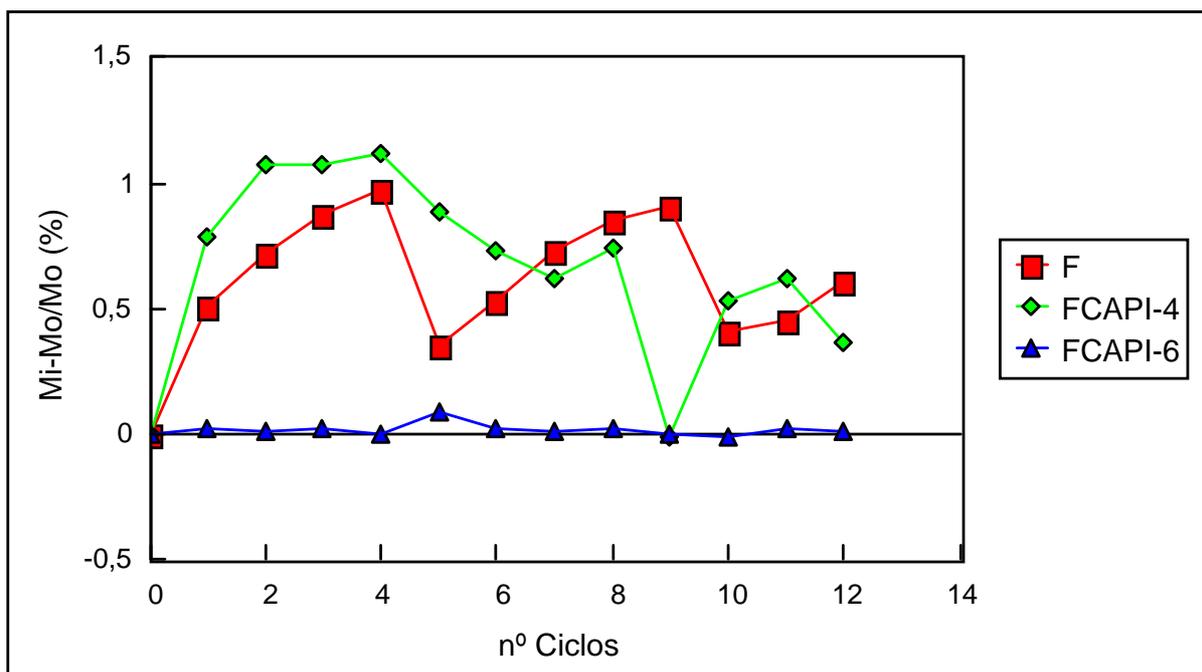
**Figura 39.** Desorción de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



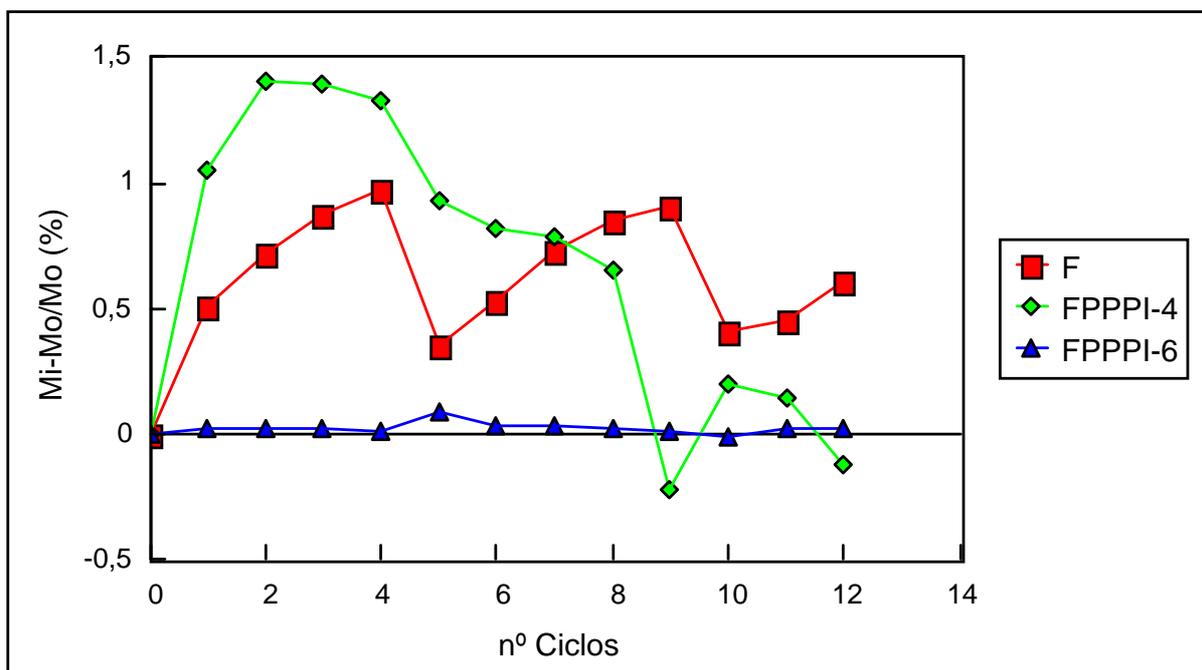
**Figura 40.** Absorción libre de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.



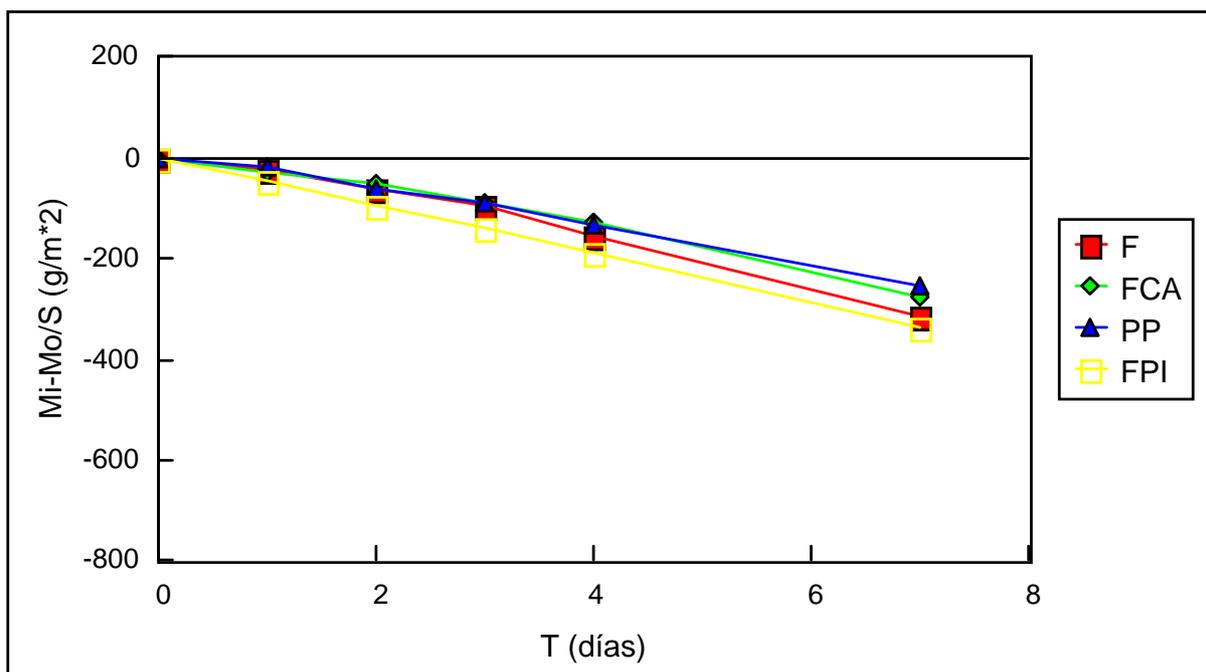
**Figura 41.** Absorción libre de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



**Figura 42.** Cristalización de sales de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.



**Figura 43.** Cristalización de sales de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



**Figura 44.** Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca del Figaró, sin tratar y tratada.

## 6.2 Calcilutita del Lorito

### 6.2.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 11 se presentan los parámetros obtenidos de la caracterización petrofísica y la variación porcentual de masa tras el ensayo de envejecimiento artificial acelerado para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos, aplicados por 6 y 4 caras.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ (%)
<b>L</b>	32,02	17,07	11,73	58,02	74,90	30,82
<b>LCAPI-6</b>	30,41	16,01	0,23	16,73	16,21	0,05
<b>LCAPI-4</b>	30,97	16,46	2,00	10,98	68,05	9,44
<b>LPPPI-6</b>	29,11	15,35	0,18	0,84	8,47	0,13
<b>LPPPI-4</b>	30,02	15,77	1,83	17,39	73,08	9,73

**Tabla 11.** Propiedades petrofísicas de la calcilutita del Lorito (L) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI), por 6 y 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado.

La porosidad de las probetas tratadas es ligeramente más baja que la de las probetas sin tratar. La disminución del valor de esta propiedad en las probetas tratadas por 6 caras no es mucho mayor que en el caso de las tratadas por 4 caras, al igual que el grado de saturación que adquieren las probetas.

El coeficiente de Absorción capilar de probetas tratadas por 6 caras disminuye mucho, del orden del 98%, respecto al que presentan las probetas sin tratar. Este coeficiente no disminuye tanto en las probetas tratadas por 4 caras, aunque su reducción es de un 83%, siendo las probetas tratadas con CAPI las que tienen un coeficiente más similar a las probetas sin tratar (ver figuras 45 y 46).

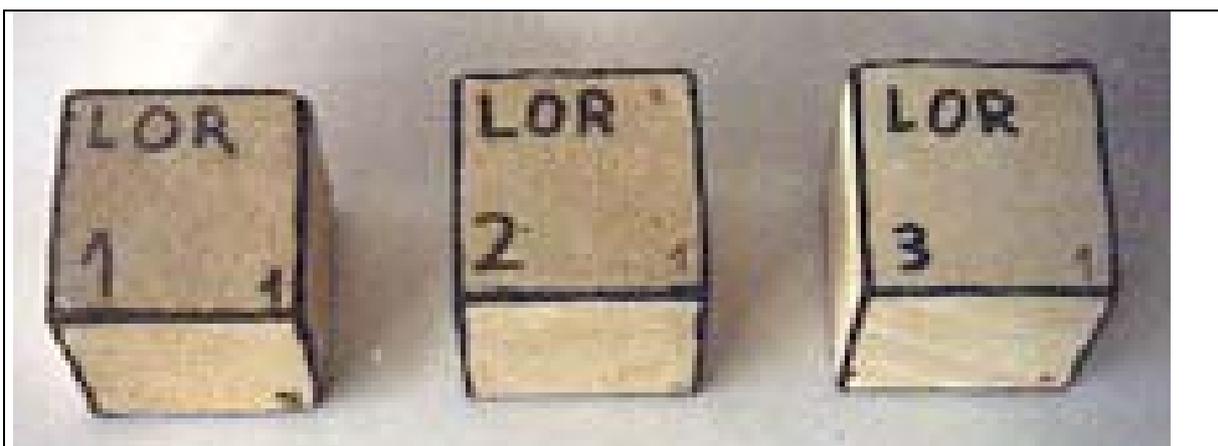
Esta roca tiene una desorción muy lenta, y una vez tratada, presenta variaciones según el tratamiento aplicado, aunque siempre desorbe mejor que la roca sin tratar (ver figuras 47 y 48). Las probetas tratadas con PPPI aplicado por 6 caras casi no retienen agua; las tratadas con este tratamiento aplicado por 4 caras son las que más agua retienen de las 4 modalidades de tratamiento ensayadas. En el caso de las probetas tratadas con CAPI se produce una dinámica de pérdida de agua muy similar, siendo las probetas tratadas por 4 caras las que menos agua retienen.

Tras 48 horas de absorción libre, las probetas sin tratar adquieren un grado de saturación del 75%; las probetas tratadas por 4 caras alcanzan grados de saturación ligeramente inferiores y las tratadas por las 6 caras adquieren grados de saturación muy inferiores, del orden de un 80% menos (ver figuras 49 y 50).

Una vez finalizado el ensayo de cristalización de sales, las probetas tratadas por 6 caras no han perdido casi masa; en el caso de las probetas tratadas por 4 caras sólo se ha podido llegar a realizar 8 ciclos, ya que la zona de roca tratada se ha despegado de la roca sin tratar.

Las probetas tratadas con CAPI, tanto por 6 caras como por 4, pierden menos masa que las tratadas con PPPI.

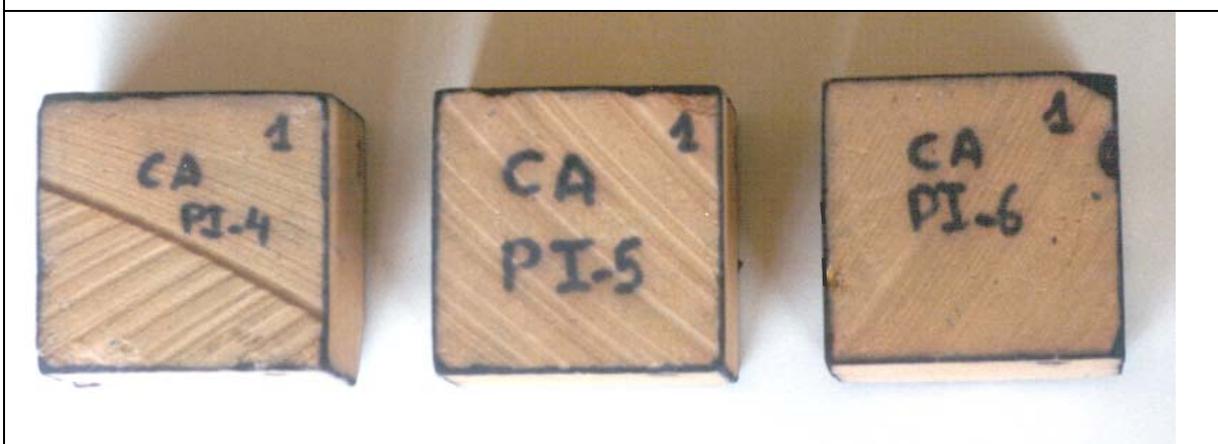
Se ha de tener en cuenta, sin embargo, que las probetas sin tratar sufren una alteración muy importante en este ensayo, y que el tratamiento de este tipo de roca es muy eficaz (ver figuras 51 y 52) (ver fotos 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 y 50).



**Foto 41.** Probetas antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



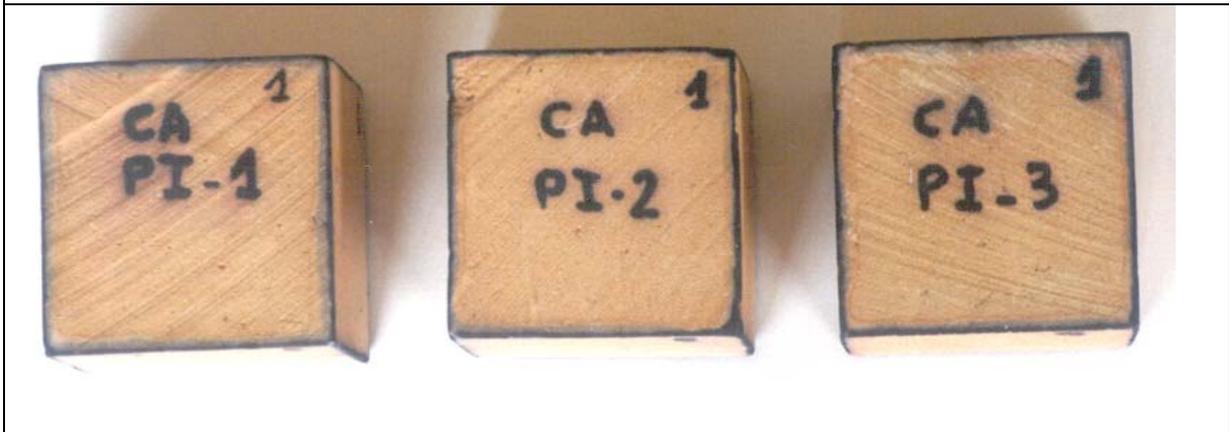
**Foto 42.** Probetas envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 43.** Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 44.** Probetas tratadas con CAPI por 6 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 45.** Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



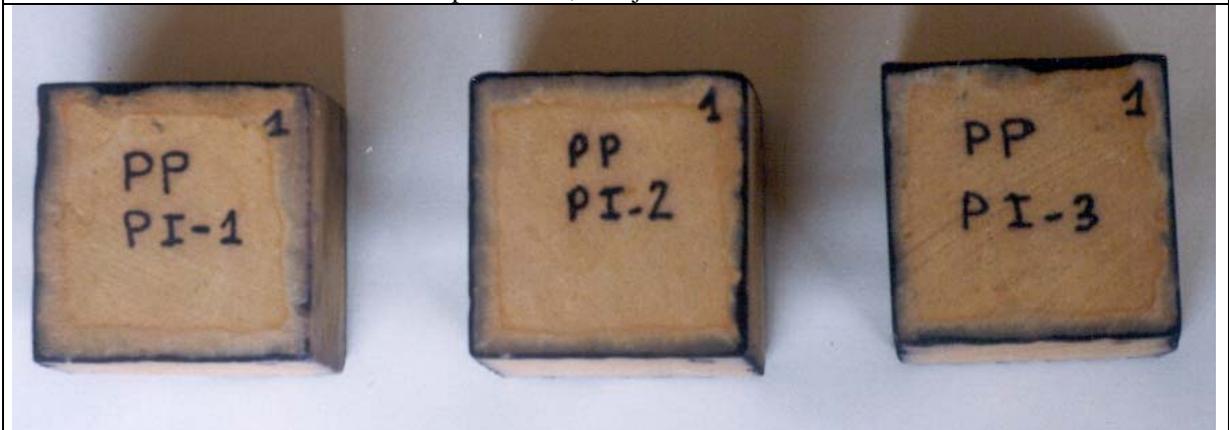
**Foto 46.** Probetas tratadas con CAPI por 4 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 47.** Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 48.** Probetas tratadas con PPPI por 6 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 49.** Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, antes de ser envejecidas de la Calcilutita del Lorito.



**Foto 50.** Probetas tratadas con PPPI por 4 caras, envejecidas de la Calcilutita del Lorito.

En la Tabla 9 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos. En la figura 53 se representan gráficamente estos valores.

	<b>Kv' (g/(m<sup>2</sup>*24h))</b>
<b>L</b>	241,64
<b>LCA</b>	216,47
<b>LPP</b>	201,14
<b>LPI</b>	206,64

**Tabla 12.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la calcilita del Lorito (L) tratada con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tres tratamientos han reducido entre un 10 y un 16% el valor de la permeabilidad, siendo el tratamiento que menos ha reducido esta propiedad el Consistone A.

### 6.2.2 Comentario

La porosidad de esta roca, así como su capacidad de absorber agua en condiciones de vacío se ven ligeramente reducidas al ser tratada con los distintos tratamientos ensayados, tanto en el caso del tratamiento completo como en el de por cuatro caras.

Si bien este hecho podría ser un problema, cabe recordar que se trata de una roca muy porosa. Los tratamientos ensayados han conseguido reducir drásticamente tanto la capacidad de succión de agua por capilaridad y la absorción en condiciones ambientales, como la retención de agua al finalizar la deserción:

- Tratando las seis caras se ha impedido que el agua acceda a la red porosa de la roca, ya que ésta es de radio de acceso muy pequeño y los distintos tratamientos ensayados han conseguido reducirla aún más.
- Tratando las cuatro caras, se han obtenido reducciones de los valores de las propiedades estudiadas muy interesantes. Además, la roca tratada se ha comportado mejor frente al ataque de las sales solubles que si lo comparamos con la roca sin tratar.

También se ha de tener en cuenta que, si bien los tratamientos han conseguido que la roca se altere menos frente a la acción mecánica de la cristalización de sales, las probetas tratadas por 4 caras han sufrido importantes desplazaciones, sin llegar a finalizar los 12 ciclos de ensayo. Además, se ha de tener en cuenta que en la realidad, raras veces se puede tratar todas las superficies de un edificio.

Como conclusión, el tratamiento que menos modifica las propiedades petrofísicas de esta caliza es el Consistone A y Parrogum Invisible, tanto en el caso de las probetas tratadas por 4 caras como en el de las probetas tratadas por 6 caras.

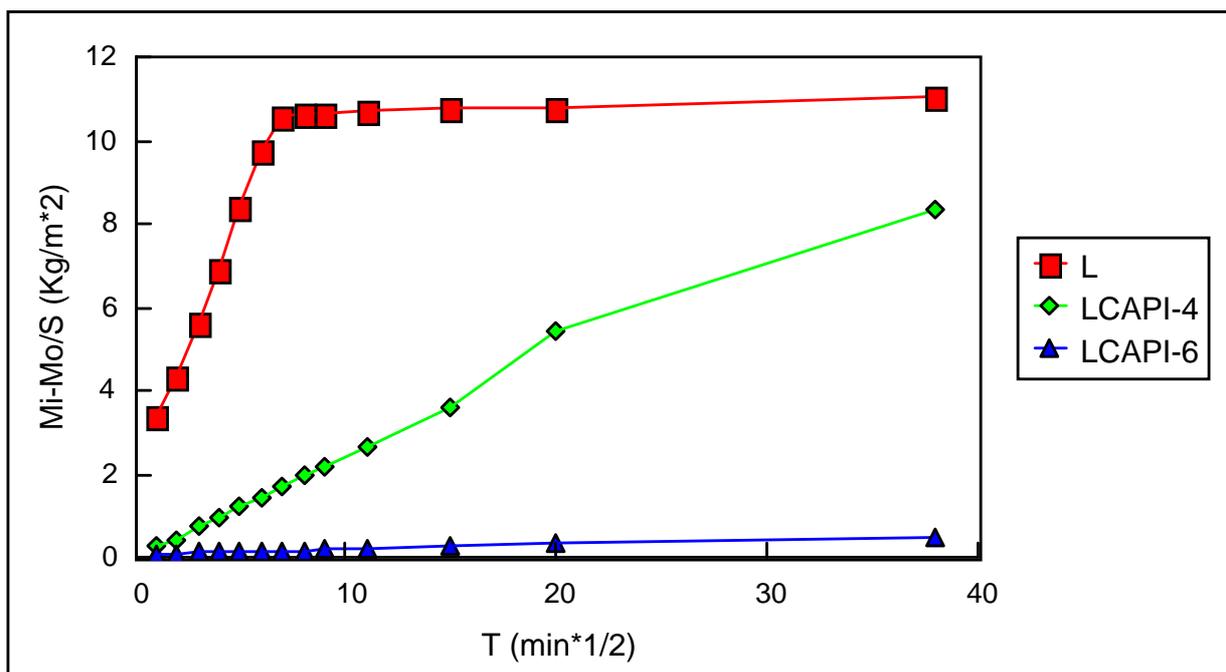


Figura 45. Succión capilar de la Calcilita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.

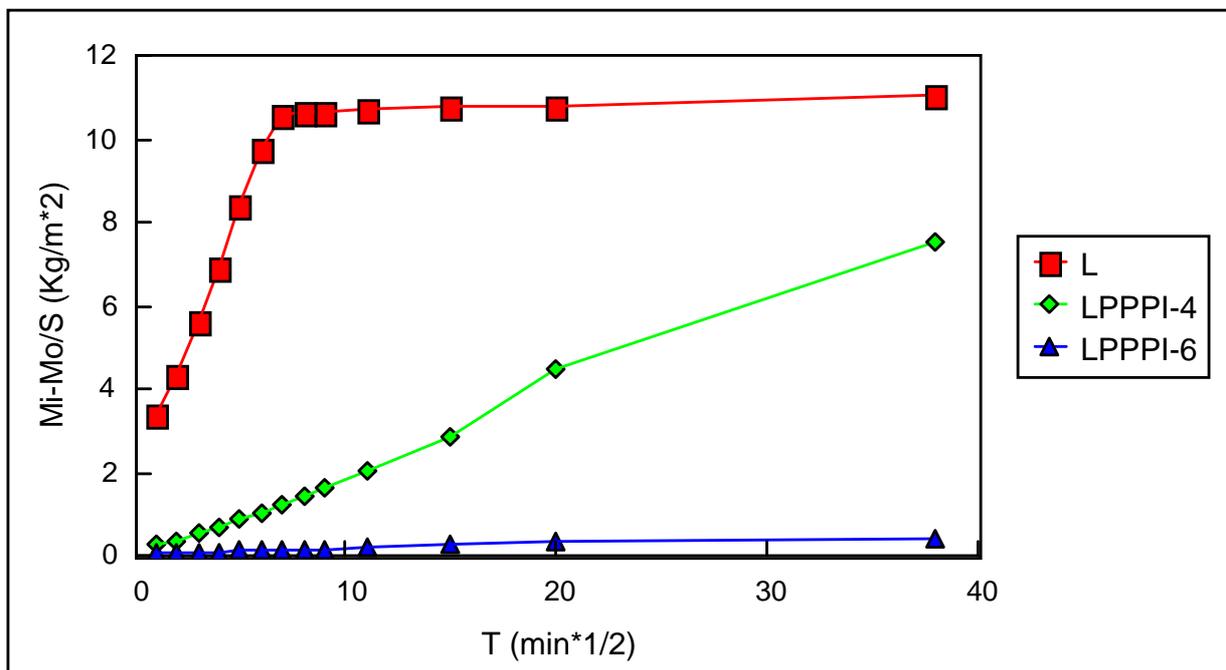
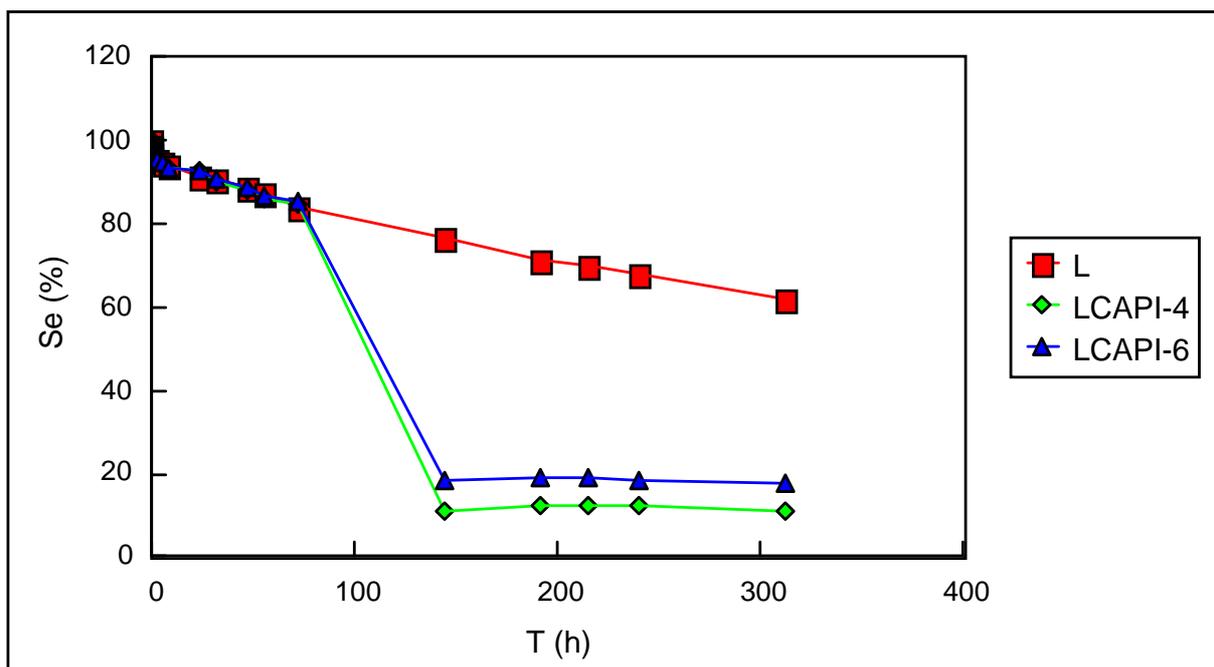
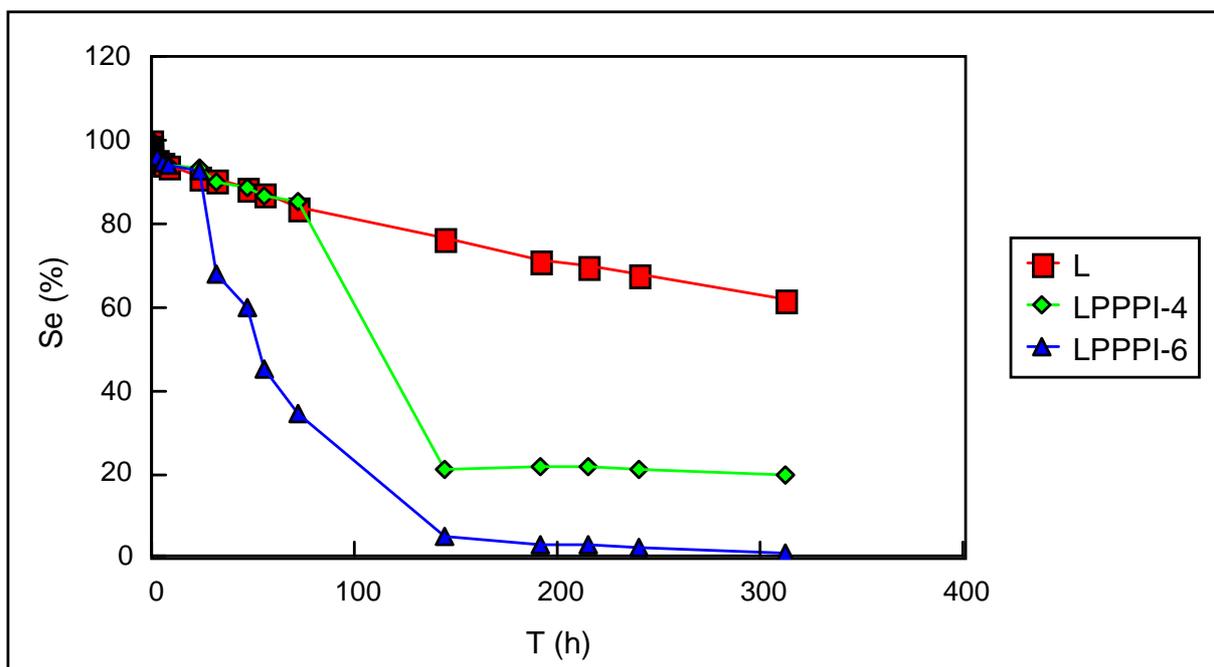


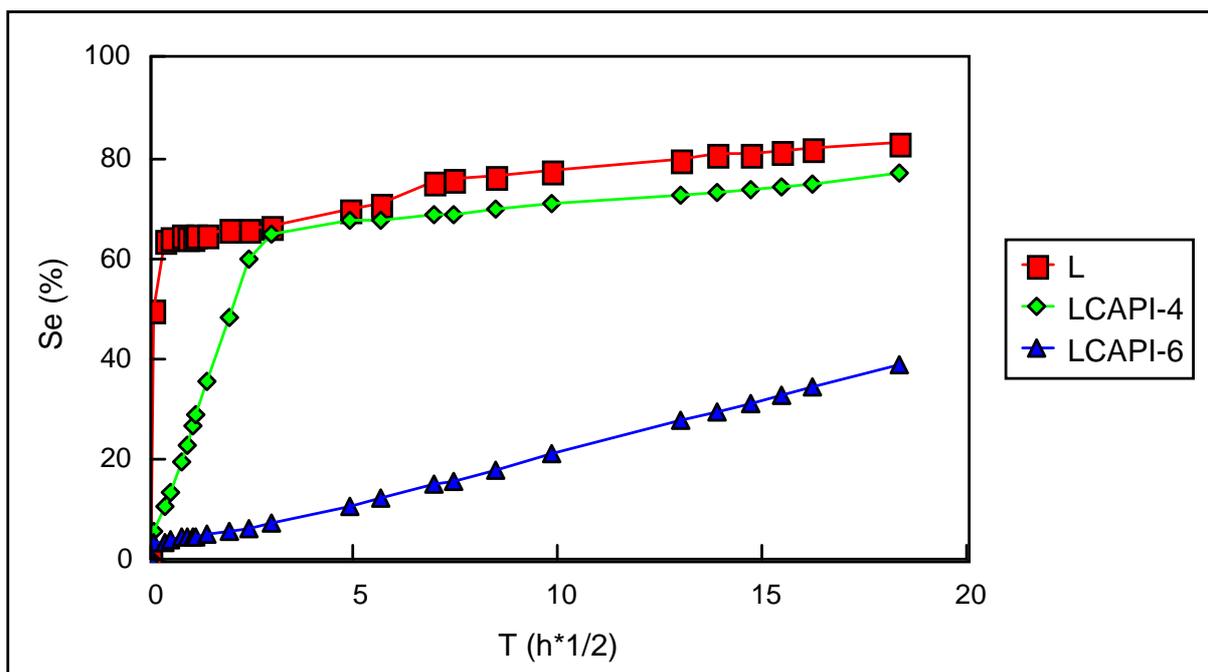
Figura 46. Succión capilar de la Calcilita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



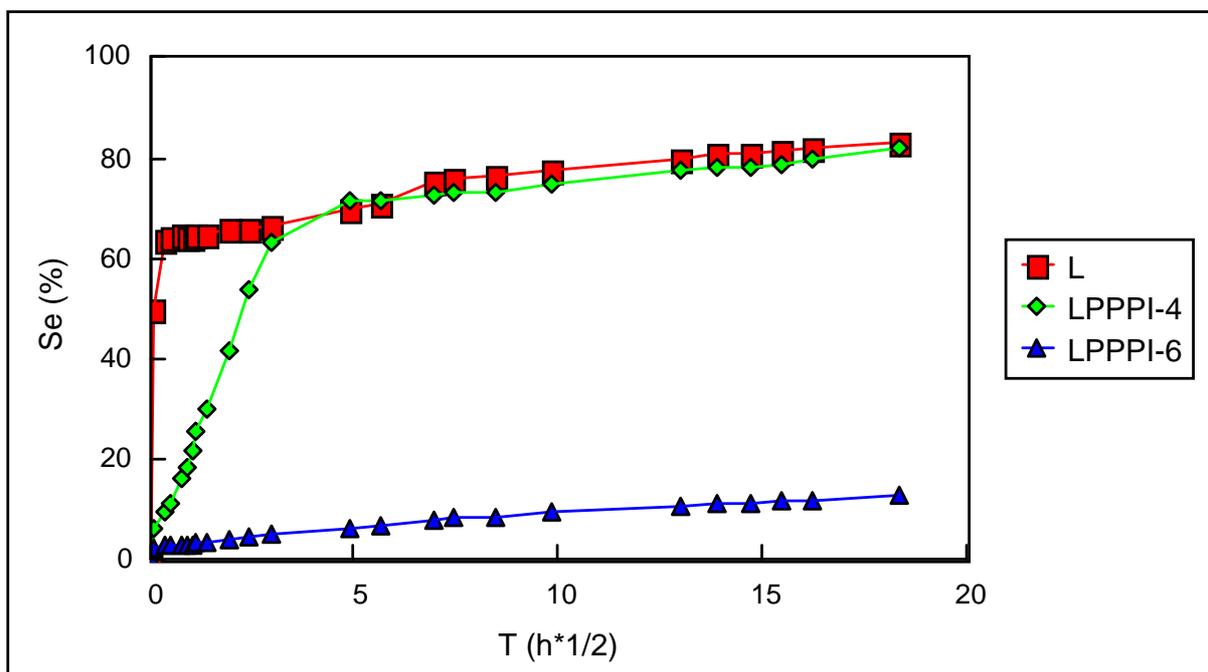
**Figura 47.** Desorción de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.



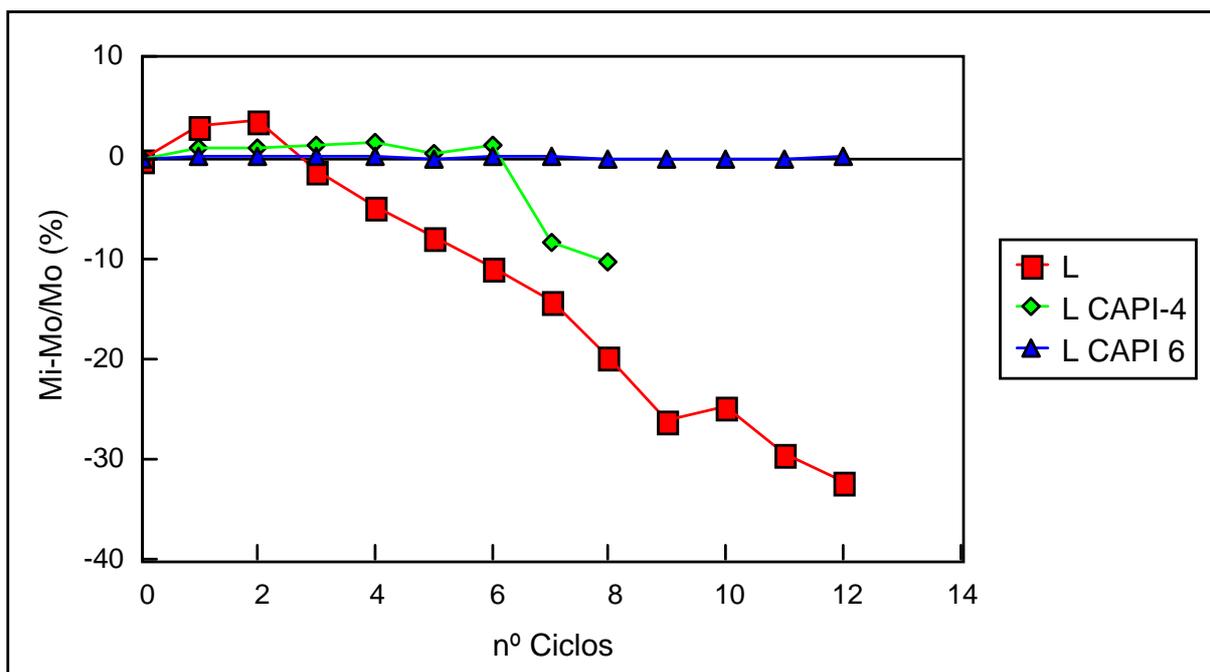
**Figura 48.** Desorción de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



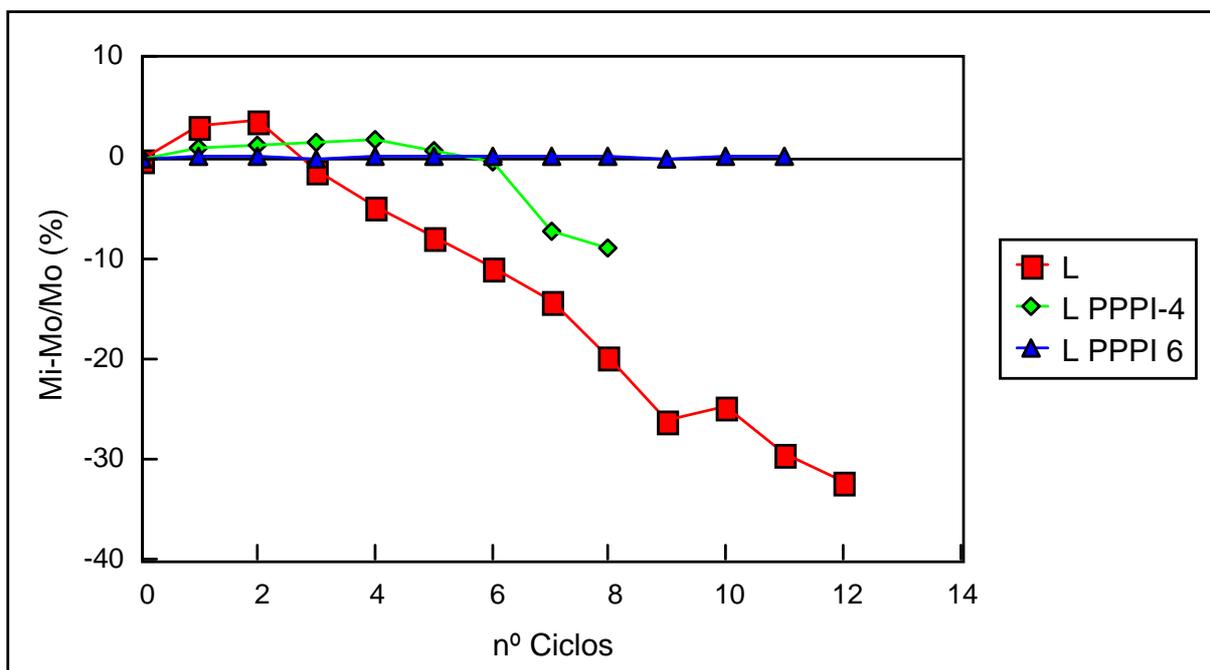
**Figura 49.** Absorción libre de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.



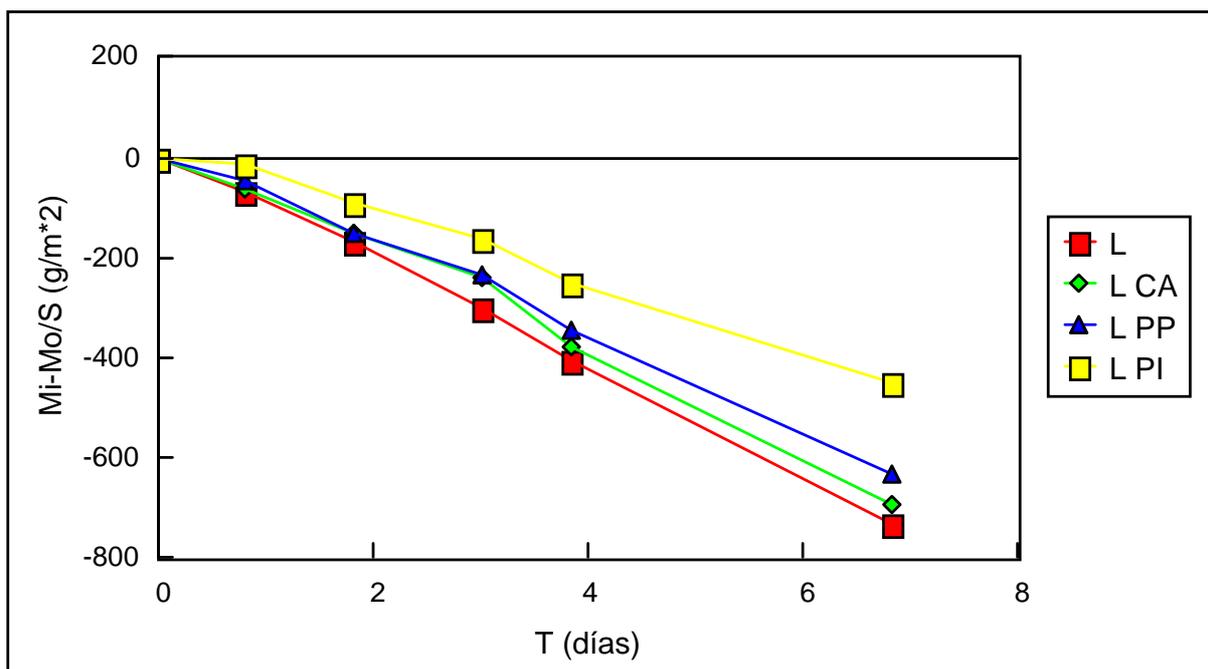
**Figura 50.** Absorción libre de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



**Figura 51.** Crisolización de sales de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CAPI por 4 y 6 caras.



**Figura 52.** Crisolización de sales de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con PPPI por 4 y 6 caras.



**Figura 53.** Permeabilidad al vapor de agua de la Calcilutita del Lorito, sin tratar y tratada con CA, PP y PI.

## 6.3 Caliza de Hontoria

### 6.3.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 13 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca sin tratar y una vez tratada por las 4 caras, así como la variación de masa de las probetas tras el envejecimiento artificial acelerado mediante el ensayo de cristalización de sulfato sódico.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ (%)
<b>A</b>	22,24	10,54	4,68	32,65	79,32	0,51
<b>A CAPI</b>	23,21	11,18	1,99	42,36	68,05	-0,47
<b>A PPPI</b>	22,61	10,88	1,80	41,75	59,83	-0,24

**Tabla 13.** Propiedades petrofísicas de la caliza de Hontoria (A) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI), por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado.

La porosidad de este tipo de roca aumenta ligeramente al ser tratada con los productos experimentados; también aumenta su capacidad de absorber agua en condiciones de vacío.

Se observa que hay una disminución importante en la velocidad con la que las probetas tratadas succionan agua por capilaridad, reduciéndose del orden del 60%, siendo las probetas tratadas con CAPI las que más rápidamente succionan agua por capilaridad (ver figura 54).

También se puede apreciar que las probetas tratadas retienen más cantidad de agua, tras los 12 días de desorción, que las probetas sin tratar (ver figura 55), siendo las tratadas con CAPI las que más agua retienen.

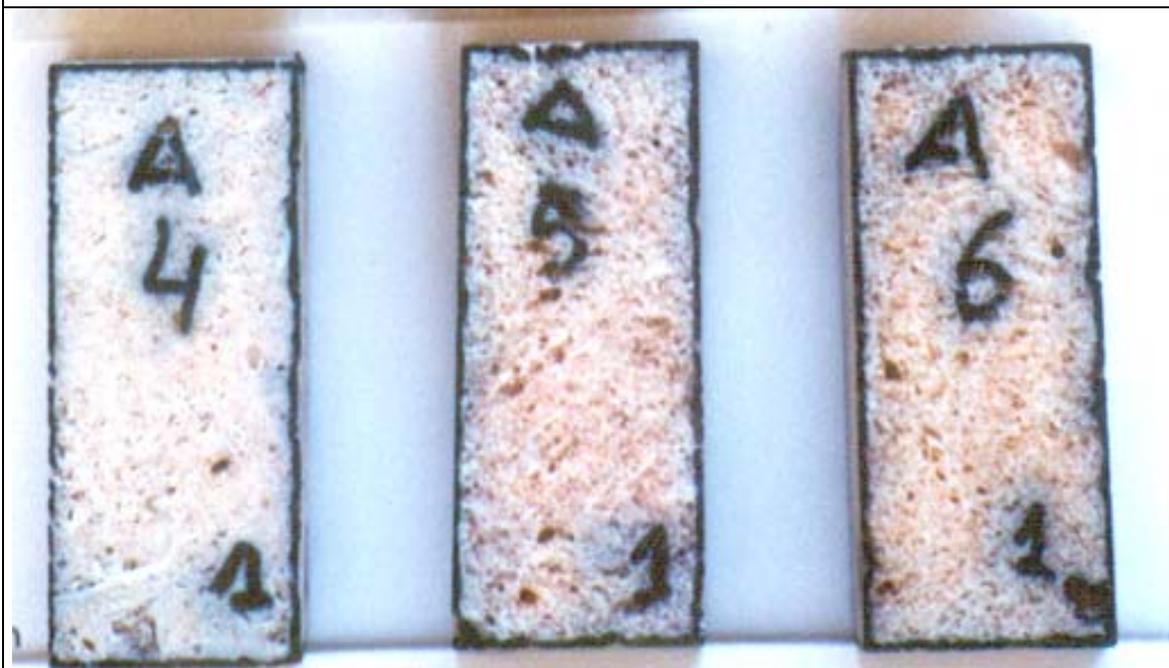
Las probetas tratadas absorben menos agua que las probetas sin tratadas, en condiciones ambientales (ver figura 56), del orden entre un 14 y un 24% menos. Entre las probetas tratadas, a las que se les ha aplicado el tratamiento CAPI son las que más agua absorben.

El hecho que las probetas tratadas, al finalizar el ensayo de cristalización de sales, experimenten un ligero incremento de masa puede estar relacionado con una retención de agua, respecto a las probetas sin tratar (ver figura 57). Se ha de tener en cuenta que, tras el ensayo realizado, en una probeta tratada con Consistone A y Parrogum Invisible se produjo una separación entre la zona tratada y la no tratada (ver foto 54).

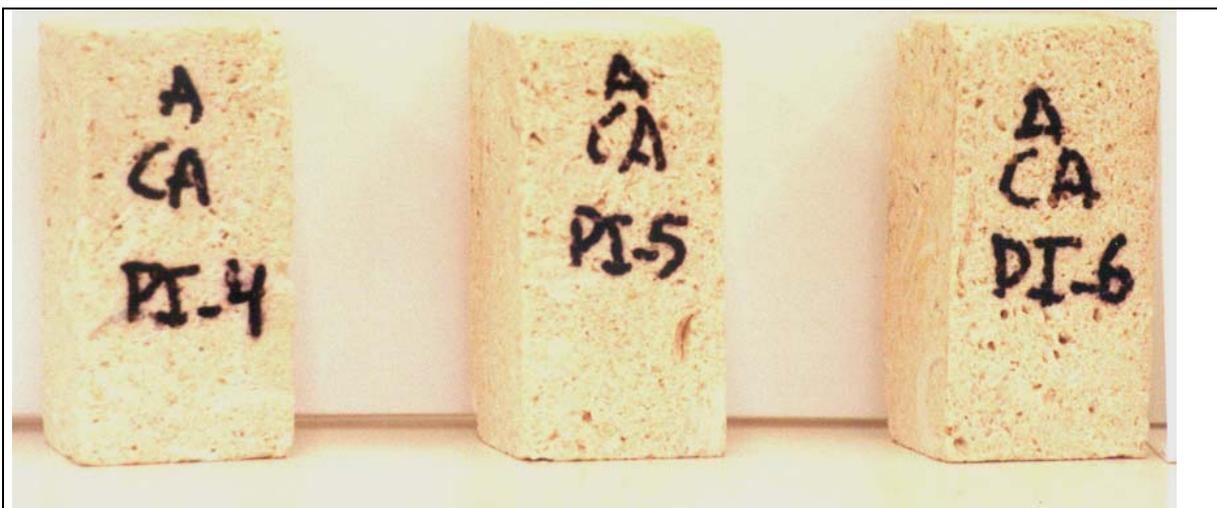
También cabe remarcar que las probetas tratadas no experimentan cambio de color con ninguno de los dos tratamientos (ver fotos 51, 52, 53, 54, 55 y 56).



**Foto 51.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria.



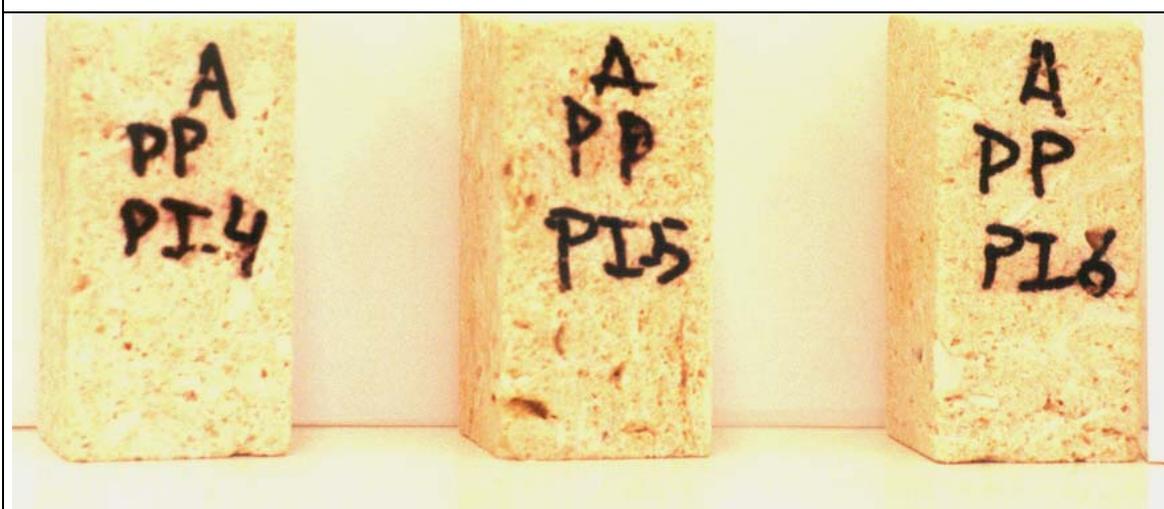
**Foto 52.** Probetas sin tratar, envejecidas de la Caliza de Hontoria.



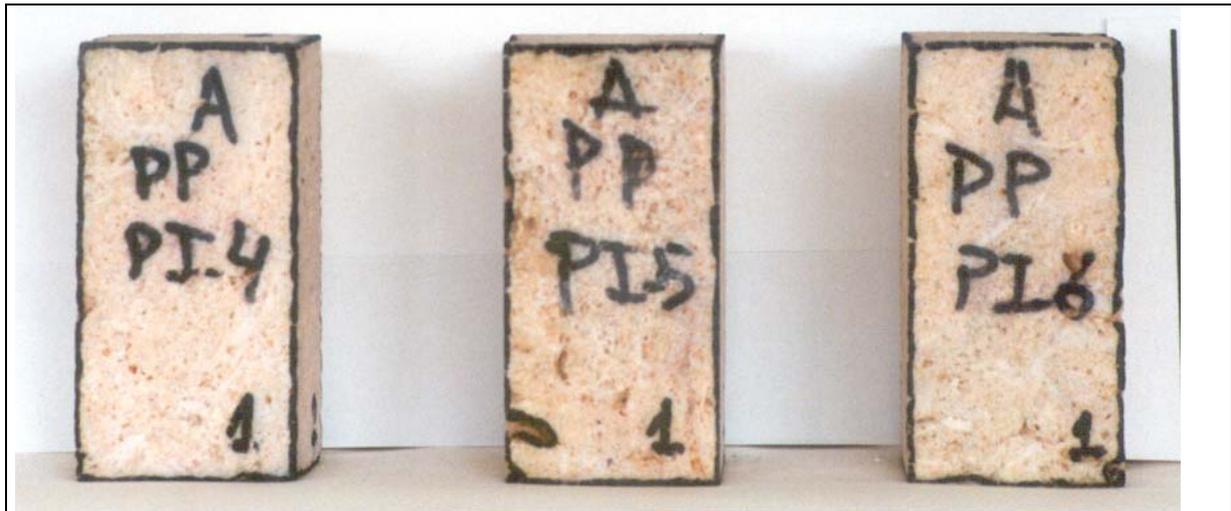
**Foto 53.** Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria.



**Foto 54.** Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de la Caliza de Hontoria.



**Foto 55.** Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de la Caliza de Hontoria.



**Foto 56.** Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de la Caliza de Hontoria.

En la Tabla 14 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos. En la figura 58 se representan gráficamente estos valores.

	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
<b>A</b>	124,62
<b>ACA</b>	107,43
<b>APP</b>	89,21
<b>API</b>	112,42

**Tabla 14.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la caliza de Hontoria (A) tratada con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tratamientos de carácter consolidante han reducido el valor de la permeabilidad; cabe recordar que estos productos también tienen carácter hidrofugante.

Las probetas tratadas con el producto de carácter puramente hidrofugante tienen un valor de permeabilidad muy similar a las probetas sin tratar, aunque ligeramente inferior.

### 6.3.2 Comentario

Los tratamientos ensayados provocan una ligera reducción de los valores de las propiedades ensayadas, siendo el tratamiento Consistone A y Parrogum Invisible el que menos modifica los valores. Pero el hecho de que una de las probetas tratadas con estos productos, sometida al ensayo de envejecimiento artificial acelerado por cristalización de sales, se haya agrietado hace desaconsejable el utilizar este par de productos conservativos en este tipo de roca,

Por tanto, el tratamiento con Plurifach P y Parrogum Invisible es el más aconsejable de entre los productos ensayados para tratar este tipo de roca, ya que es casi imposible estar seguros que la roca no contiene, o pueda contener con el tiempo, sales solubles ajenas a ella misma dentro de su red porosa.

Cabe recordar que las probetas tratadas con Plurifach P han reducido mucho la permeabilidad al vapor de agua respecto a las probetas tratadas con los otros productos y a las probetas sin tratar, lo que podría generar problemas a la larga si se aplica en zonas donde la ascensión capilar sea importante.

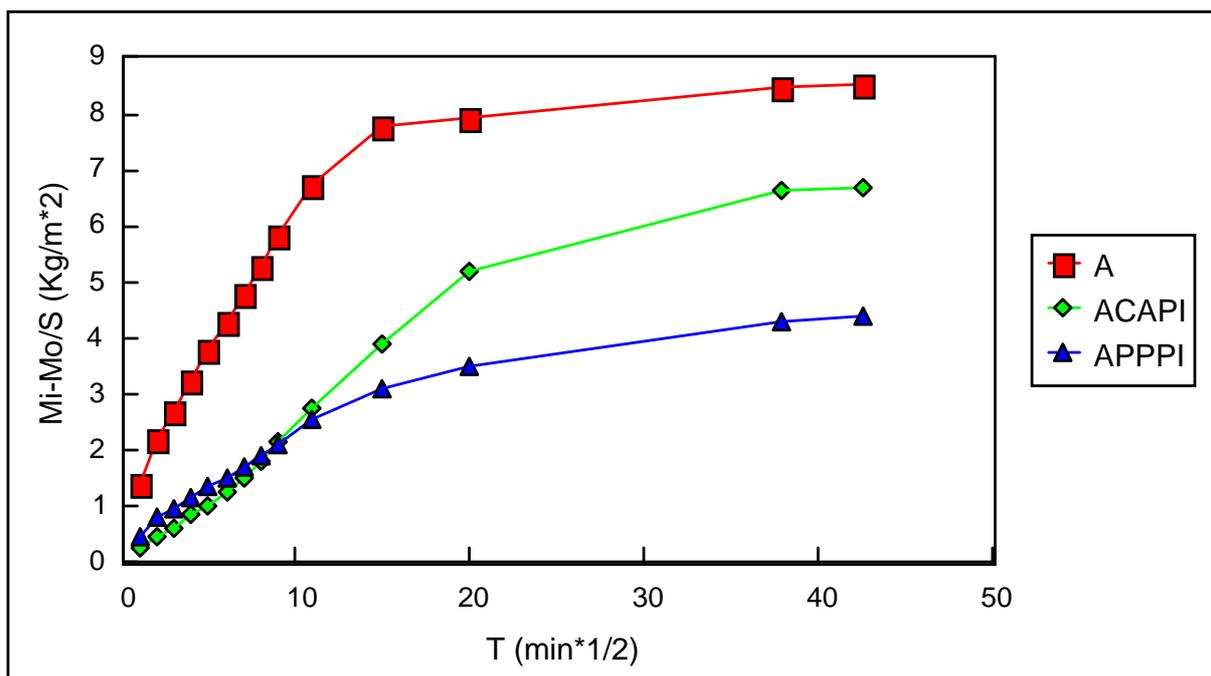


Figura 54. Succión capilar de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.

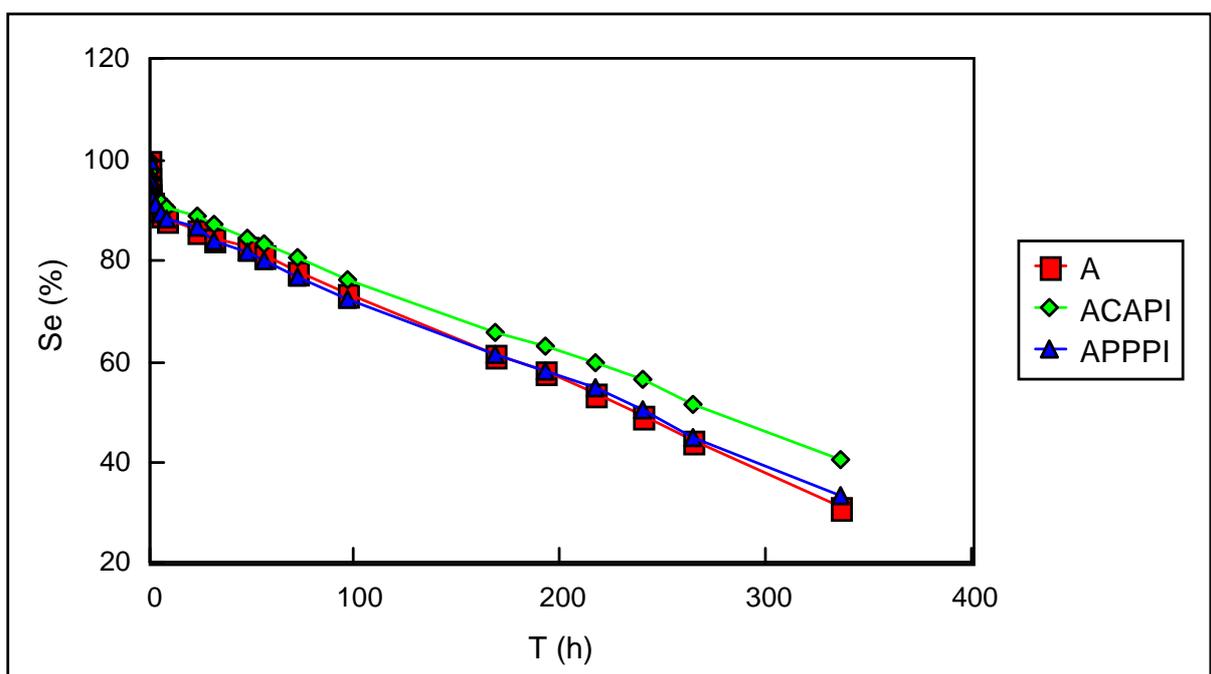


Figura 55. Desorción de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.

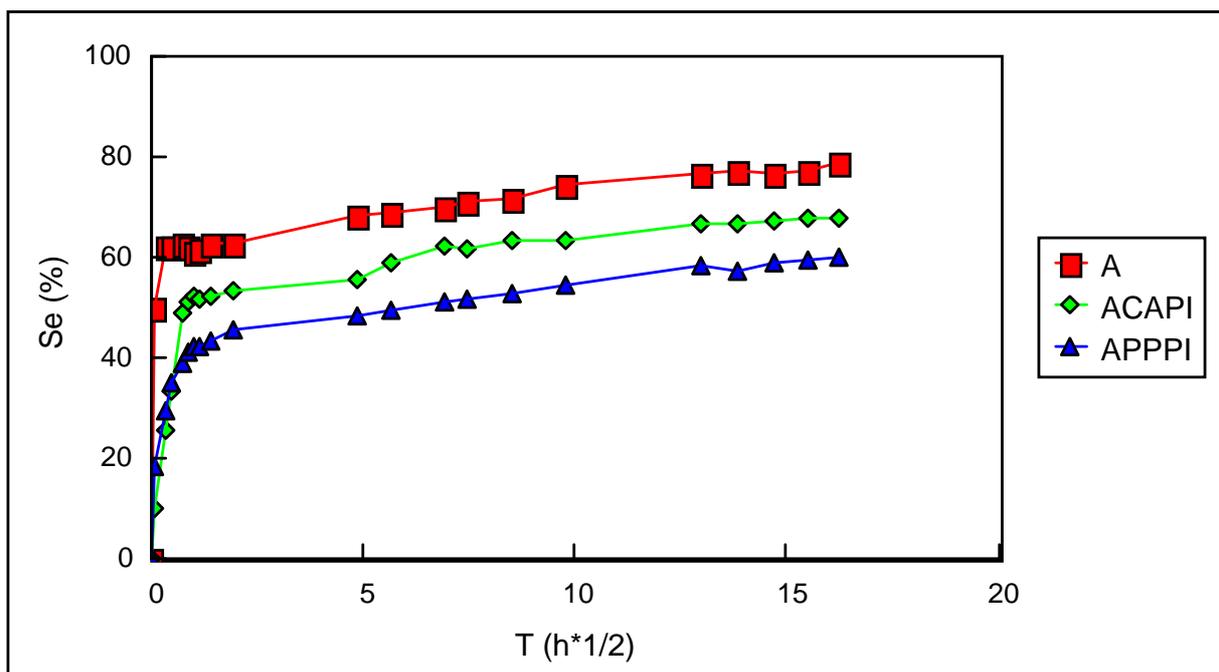


Figura 56. Absorción libre de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.

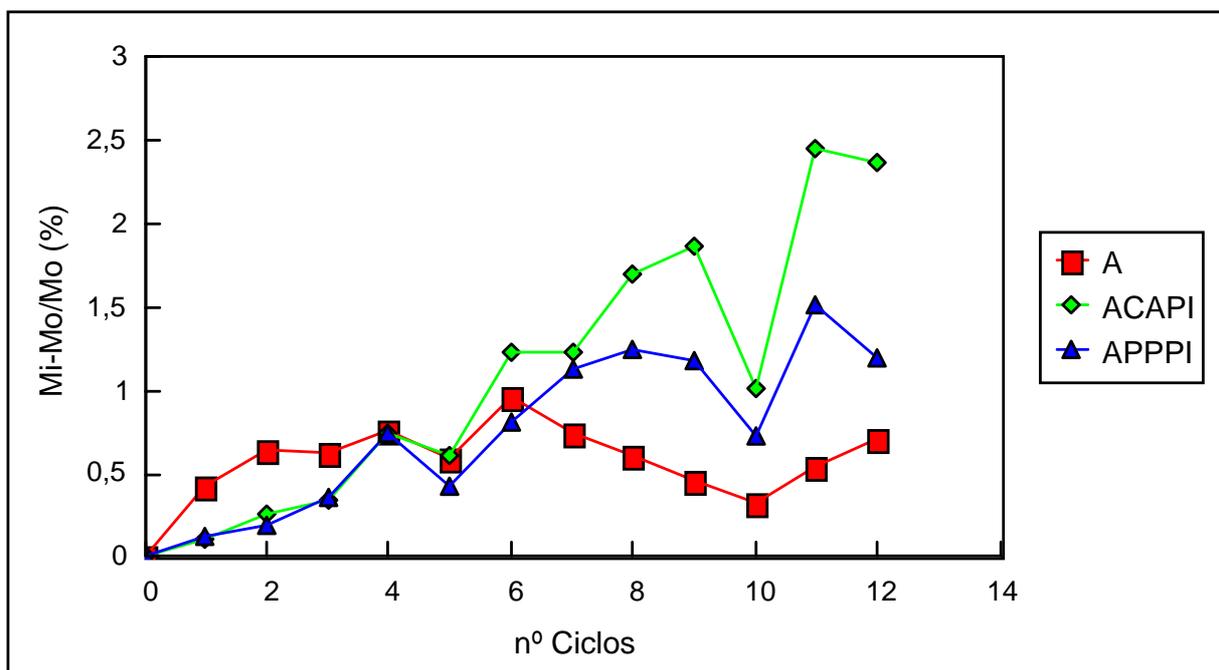
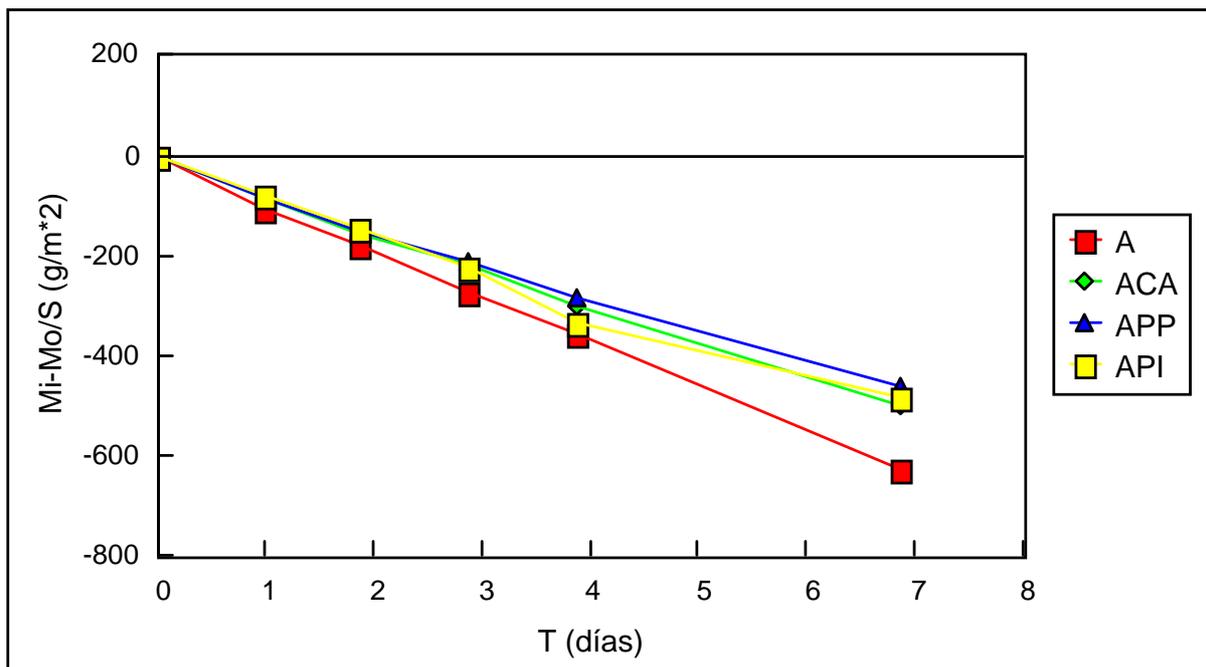


Figura 57. Cristalización de sales de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.



**Figura 58.** Permeabilidad al vapor de agua de la Caliza de Hontoria, sin tratar y tratada.

## 6.4 Arenisca de Durango

### 6.4.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 15 se presentan los parámetros de caracterización petrográfica obtenidos para este tipo de roca sin tratar y una vez tratada por las 4 caras, así como la variación de masa de las probetas tras el envejecimiento artificial acelerado mediante el ensayo de cristalización de sulfato sódico.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ (%)
<b>B</b>	10,29	4,24	1,35	52,09	82,49	0,58
<b>B CAPI</b>	9,87	4,07	0,30	42,54	86,68	0,05
<b>B PPPI</b>	9,63	3,95	0,26	40,87	89,82	0,05

**Tabla 15.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Durango (B) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI), por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado.

Los tratamientos experimentados para este tipo de roca han generado una reducción de la porosidad del orden del 5%, valor bastante aceptable. También han provocado una ligera reducción en la capacidad de absorber agua en condiciones de vacío. El tratamiento que ha inferido una reducción menor del valor de estos parámetros a este tipo de roca es el CAPI.

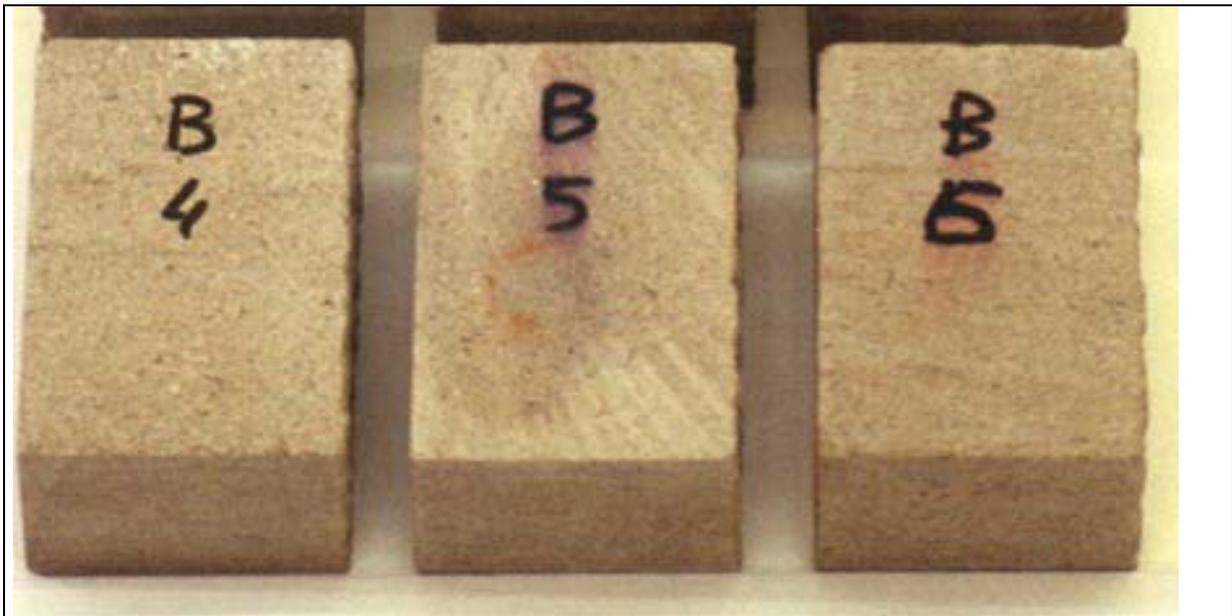
Se produce una disminución importante en la velocidad de succión de agua tras el tratamiento, del orden del 80% (ver figura 59), siendo las probetas tratadas con CAPI las que succionan agua a una velocidad mayor.

Al finalizar la desorción, las probetas tratadas retienen menos cantidad de agua que las probetas sin tratar (ver figura 60), siendo las probetas tratadas con PPPI las que menos agua retienen.

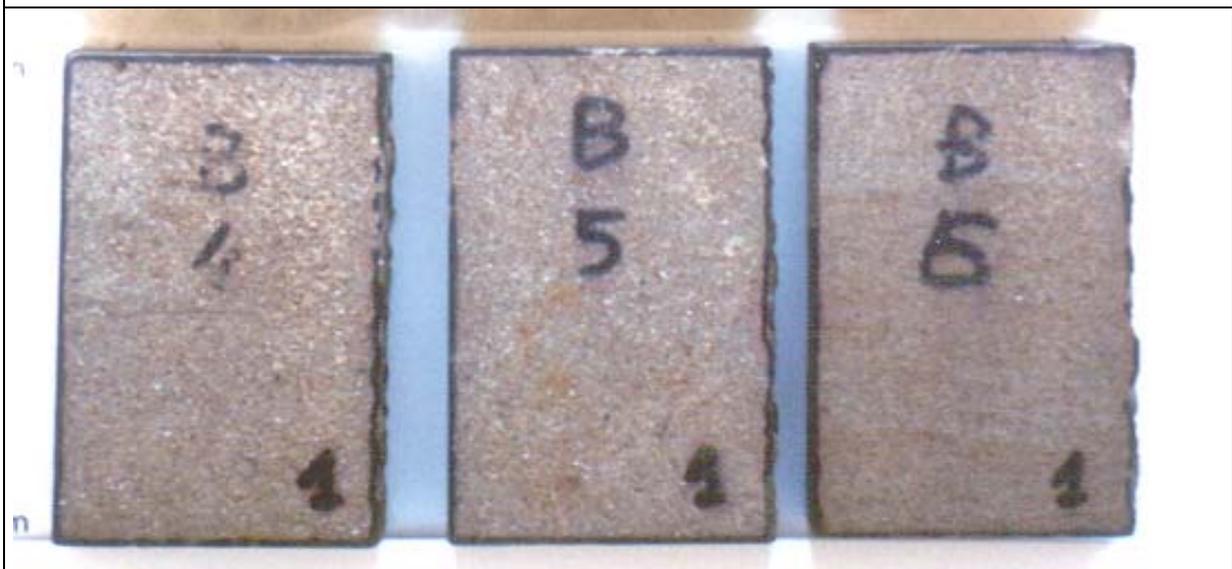
Las probetas tratadas absorben más cantidad de agua, en condiciones ambientales, que las probetas sin tratar (ver figura 61), siendo las probetas tratadas con PPPI las que más agua absorben.

Cabe remarcar que las probetas tratadas, tras el ensayo de cristalización de sales, apenas sufren pérdida de masa y no se observa ningún tipo de alteración (ver figura 62) (ver fotos 57, 58, 59, 60, 61 y 62).

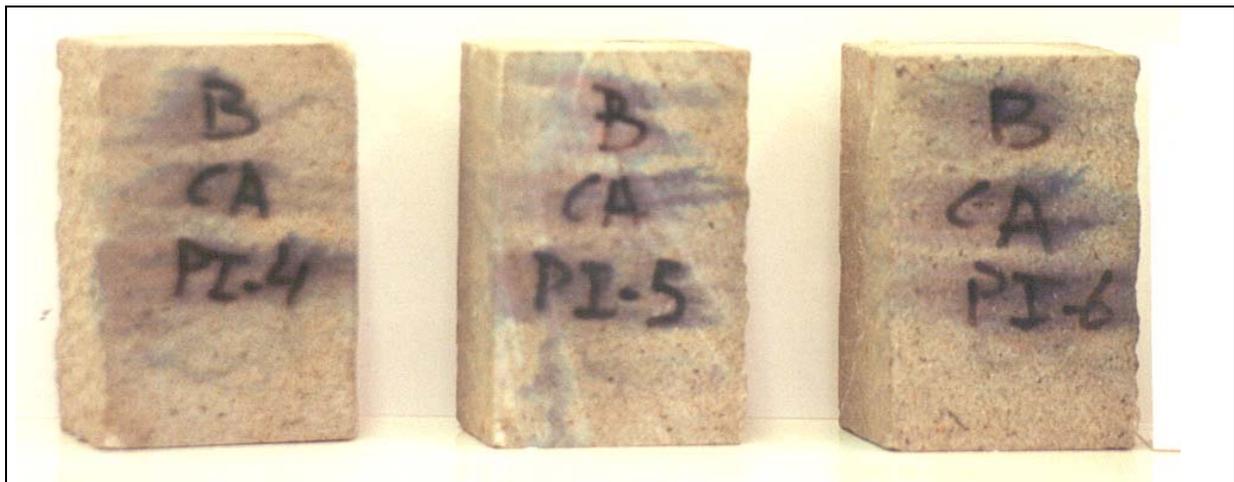
Se ha de tener en cuenta que la aplicación de Plurifach P provoca un aumento excesivo de brillo en la roca.



**Foto 57.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango.



**Foto 58.** Probetas sin tratar, envejecidas de la Arenisca de Durango.



**Foto 59.** Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango.



**Foto 60.** Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de la Arenisca de Durango.



**Foto 61.** Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Durango.



**Foto 62.** Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de la Arenisca de Durango.

En la Tabla 16 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos. En la figura 63 se representan gráficamente estos valores.

	<b>Kv' (g/(m<sup>2</sup>*24h))</b>
<b>B</b>	76,50
<b>BCA</b>	54,5
<b>BPP</b>	51,09
<b>BPI</b>	90,2

**Tabla 16.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca de Durango (B) tratada con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tratamientos de carácter consolidante han reducido el valor de la permeabilidad del orden de un 30%, dando valores muy similares. Cabe recordar que estos productos también tienen carácter hidrofugante.

Las probetas tratadas con el producto de carácter puramente hidrofugante han visto incrementada su permeabilidad al vapor de agua un 18%.

#### 6.4.2 Comentario

Los tratamientos ensayados con este tipo de roca han reducido ligeramente la movilidad del agua por la red porosa de la misma.

Cabe mencionar que la absorción de agua en condiciones ambientales de las probetas tratadas es superior que la de las probetas sin tratar. Este hecho, junto con una menor velocidad de succión de agua por las probetas tratadas, puede estar relacionado con una absorción de agua por parte de las arcillas constituyentes de la roca, ya que el agua llega más lentamente y puede ser absorbida más fácilmente por las arcillas.

En este caso, el tratamiento que menos modifica las propiedades petrofísicas de esta arenisca es el Consistone A y Parrogum Invisible.

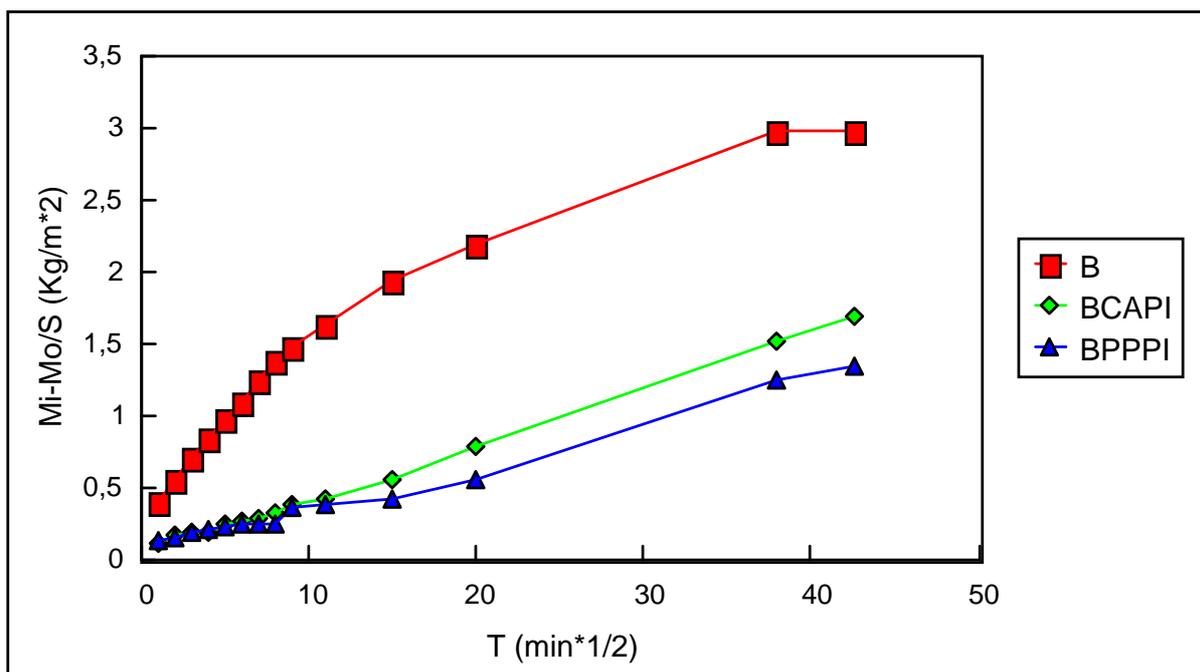


Figura 59. Succión capilar de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.

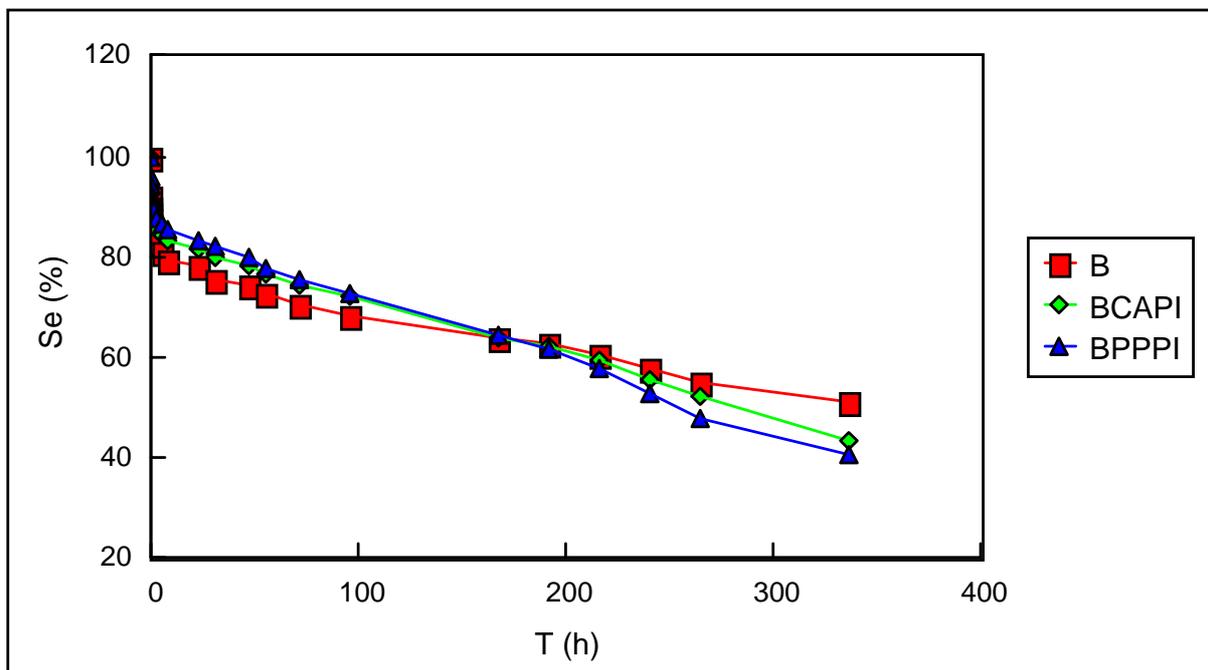


Figura 60. Desorción de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.

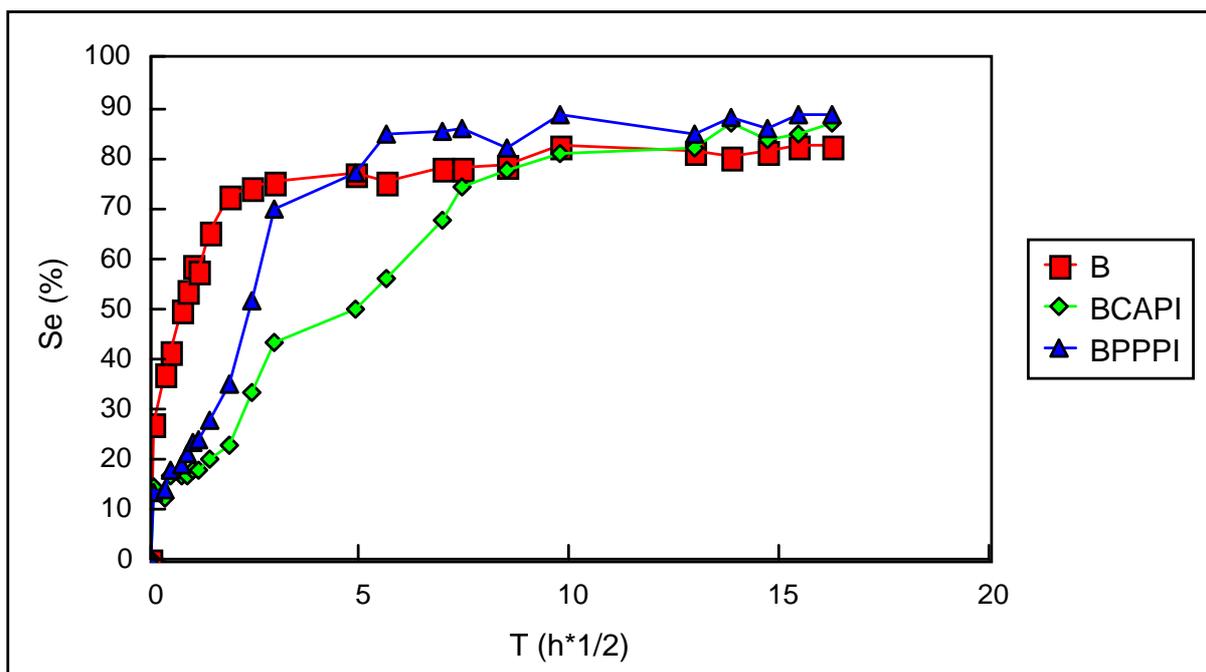


Figura 61. Absorción libre de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.

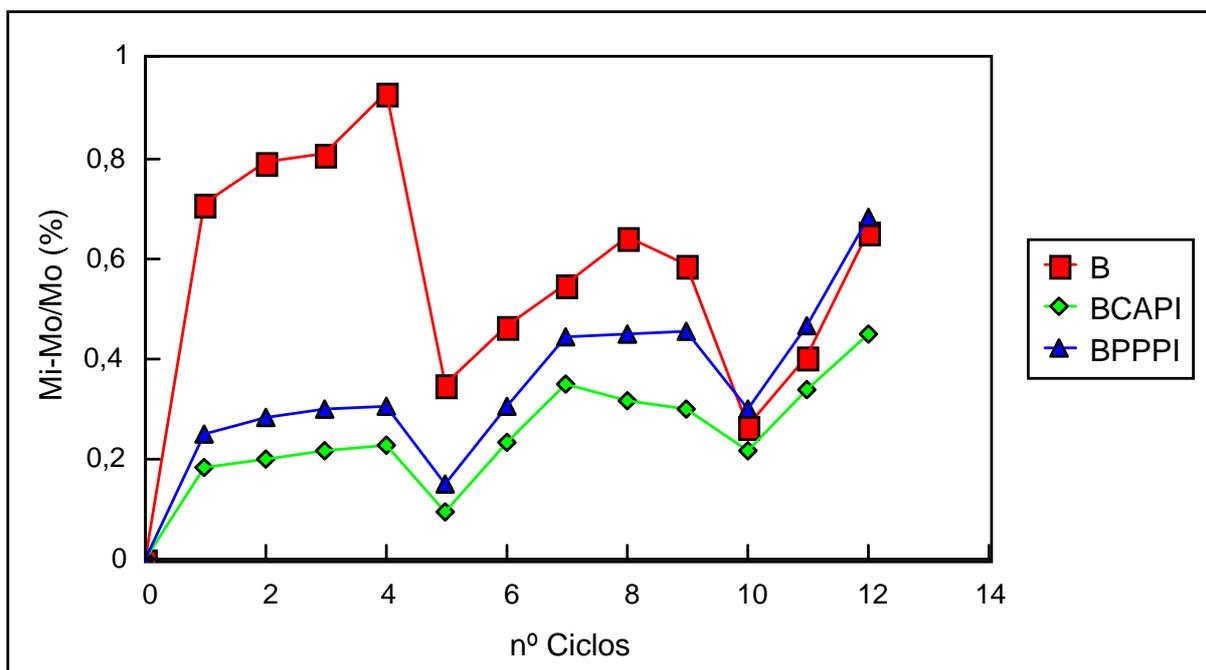
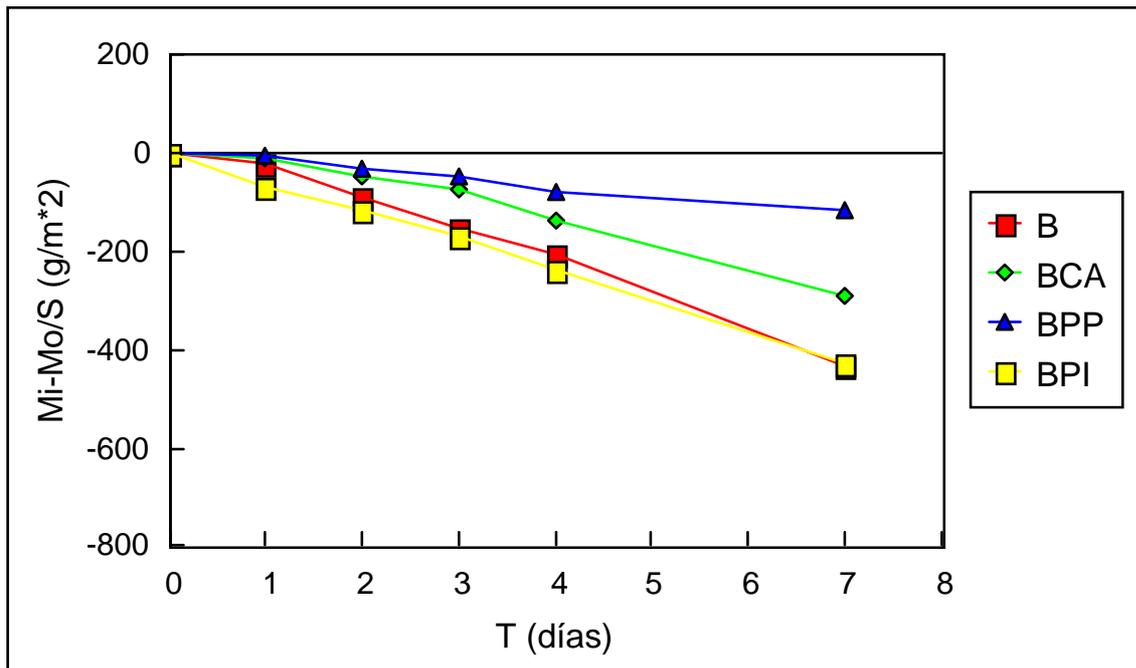


Figura 62. Cristalización de sales de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.



**Figura 63.** Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Durango, sin tratar y tratada.

## 6.5 Arenisca de Begoña

### 6.5.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 17 se presentan los parámetros de caracterización petrográfica obtenidos para este tipo de roca sin tratar y una vez tratada por las 4 caras, así como la variación de masa de las probetas tras el envejecimiento artificial acelerado mediante el ensayo de cristalización de sulfato sódico.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ (%)
<b>C</b>	14,84	6,51	1,19	38,24	73,90	0,63
<b>C CAPI</b>	15,52	6,88	0,94	22,29	61,35	0,21
<b>C PPPI</b>	14,17	6,20	0,78	23,65	69,07	0,07

**Tabla 17.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Begoña (C) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI), por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado.

La roca presenta un comportamiento diferente según el tratamiento ensayado: Las probetas tratadas con CAPI experimentan un aumento de porosidad del 4%, y consecuentemente un aumento en el contenido de agua absorbido en condiciones de vacío del 5%.

Las probetas tratadas con PPPI presentan una disminución de porosidad del 4%, y por consiguiente una disminución en el contenido de agua absorbido en condiciones de vacío del 5%.

En los dos casos, se observa una disminución en la velocidad de succión de agua por capilaridad (ver figura 64): el caso de las tratadas con PPPI es de un 34%. En el caso de las probetas tratadas con CAPI la reducción es de un 21%, siendo éste un comportamiento anómalo si se tiene en cuenta que la porosidad de la roca ha aumentado al aplicar este tratamiento.

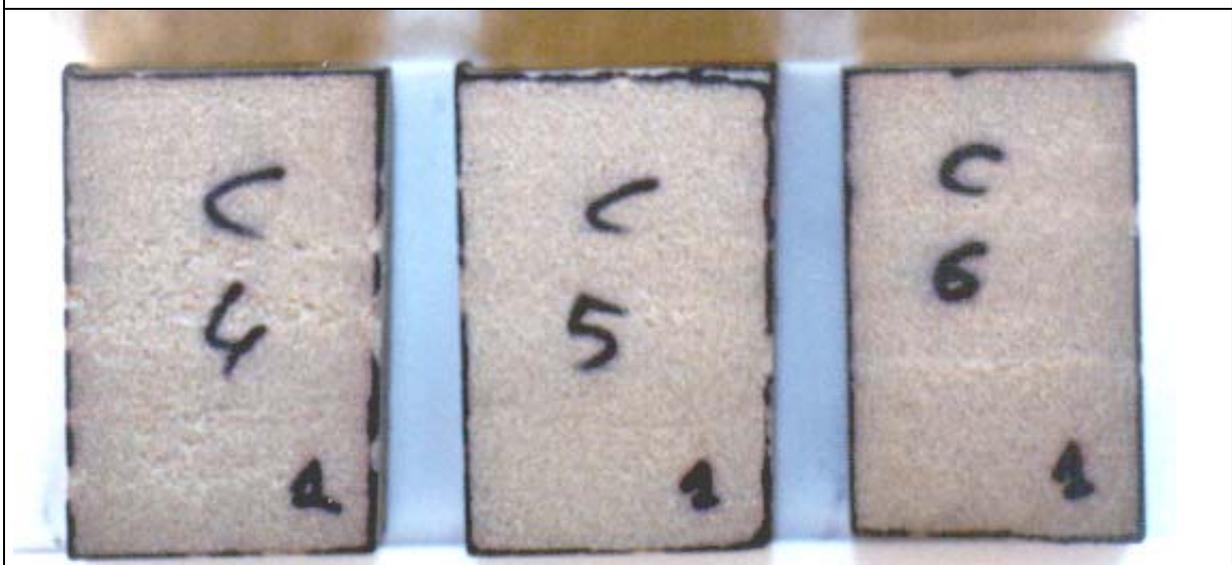
También se aprecia que las probetas tratadas, tras el ensayo de desorción, retienen menos cantidad de agua que las probetas sin tratar (ver figura 65). Las probetas que menos agua retienen son las tratadas con CAPI; cabe recordar que son las probetas que más agua han absorbido en condiciones de vacío, y la desorben más rápidamente.

Todas las probetas tratadas absorben agua, en condiciones ambientales, más lentamente que las probetas sin tratar (ver figura 66), pero al finalizar el ensayo se saturan casi por igual, siendo las probetas tratadas con CAPI las que menos agua absorben. Este comportamiento vuelve a ser anómalo, ya que estas probetas son las que más agua absorben en condiciones de vacío.

Las probetas tratadas, tras el ensayo de cristalización de sales, experimentan una pérdida de peso que, si bien no es muy importante (ver figura 67), es preocupante ya que esta pérdida va asociada a la formación de grandes grietas paralelas a la estratificación de la roca, y además en el caso del tratamiento con PPPI se producen grietas radiales (ver fotos 67 y 68). Las probetas tratadas con CAPI también experimentan una alteración similar a las probetas sin tratar (ver fotos 63, 64, 65 y 66), remarcándose los niveles menos cementados, aunque sin llegar a producirse arenización.



**Foto 63.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña.



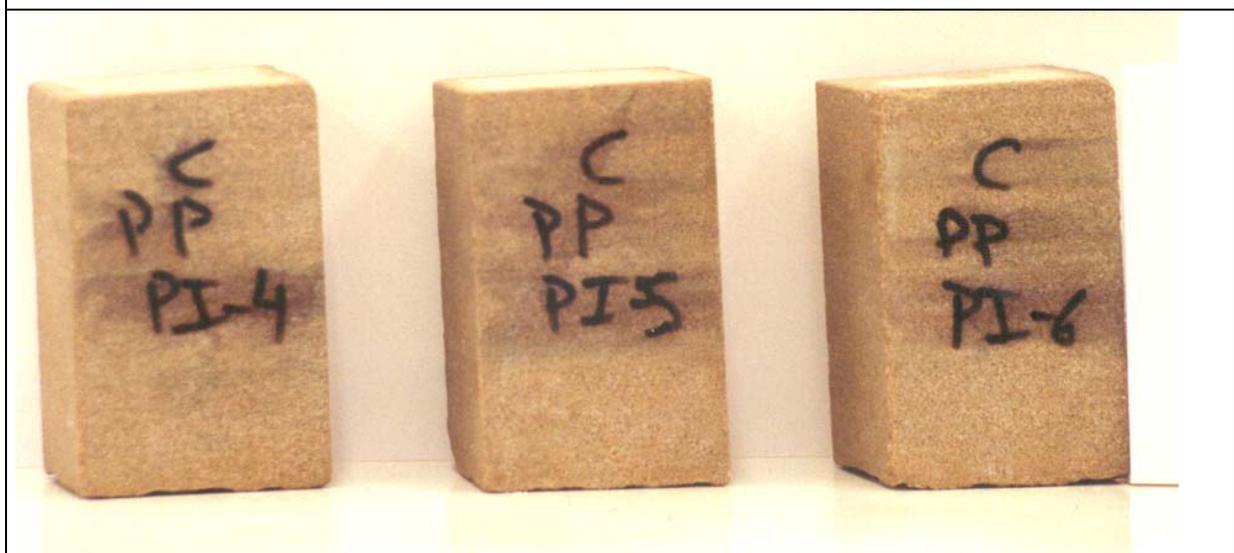
**Foto 64.** Probetas sin tratar, envejecidas de la Arenisca de Begoña.



**Foto 65.** Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña.



**Foto 66.** Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de la Arenisca de Begoña.



**Foto 67.** Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de la Arenisca de Begoña.



**Foto 68.** Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de la Arenisca de Begoña.

En la Tabla 18 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los productos conservativos. En la figura 68 se representan gráficamente estos valores.

	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
<b>C</b>	174,30
<b>CCA</b>	145,8
<b>CPP</b>	113,39
<b>CPI</b>	148,76

**Tabla 18.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca de Begoña (C) tratada con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tres tratamientos han reducido el valor de la permeabilidad.

Los tratamientos que menos han modificado esta propiedad son el PI y el CA.

### 6.5.2 Comentario

El comportamiento de las probetas tratadas con CAPI es anómalo: mientras se produce un aumento de porosidad y un aumento de absorción de agua en condiciones de vacío, la velocidad de succión de agua es más lenta y desorben mejor que las probetas sin tratar; en condiciones ambientales, absorben más lentamente que el resto de las probetas ensayadas.

Teniendo en cuenta que este tratamiento es consolidante, un aumento de porosidad se puede explicar por la forma de recubrir la red porosa de la roca.

La menor velocidad de succión de agua, así como la menor absorción de agua en condiciones ambientales se puede entender teniendo en cuenta que este tratamiento también es hidrofugante, y que la fuerza de repelencia del agua puede generar este comportamiento.

El hecho que las probetas tratadas desorban mejor que las probetas sin tratar puede indicar que el aumento de la porosidad no ha comportado una mayor tortuosidad en la red porosa, sino al contrario.

En cualquier caso, y teniendo en cuenta el comportamiento de las probetas tratadas tras el ensayo de cristalización de sales, es más aconsejable no tratar este tipo de roca con ninguno de los productos ensayados ya que, aunque parezca que sus propiedades petrofísicas quedan mejoradas con la aplicación de los tratamientos conservativos, el nefasto resultado obtenido en el ensayo de envejecimiento artificial acelerado por cristalización de sales los hace desaconsejables.

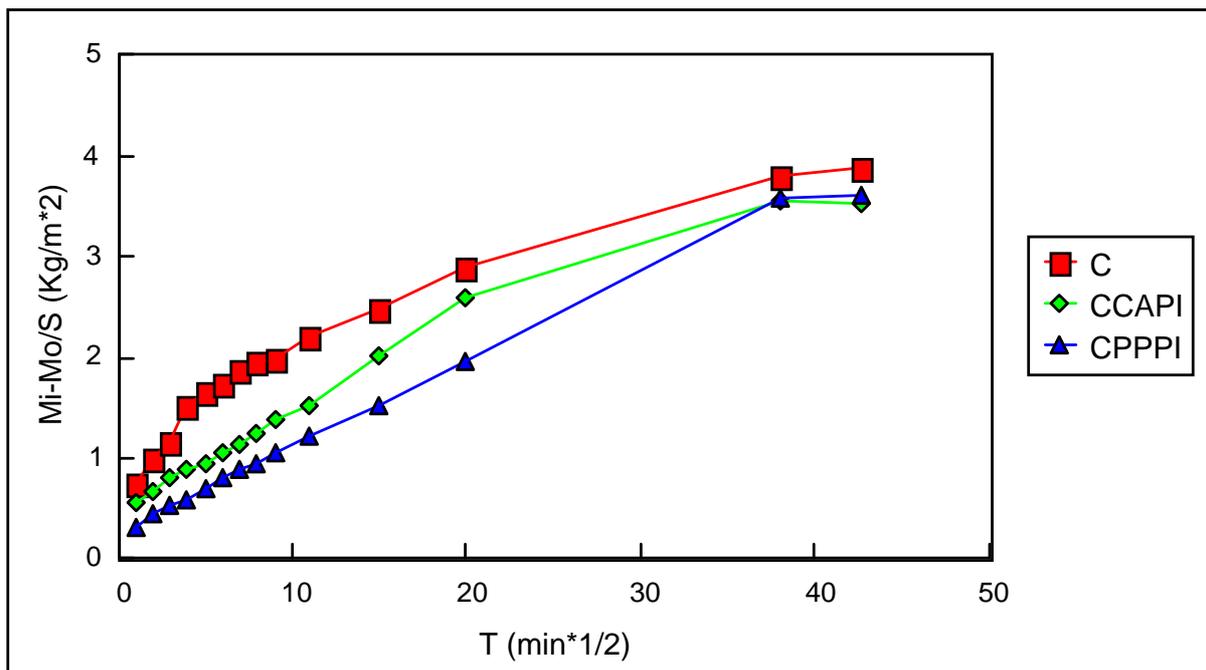


Figura 64. Succión capilar de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.

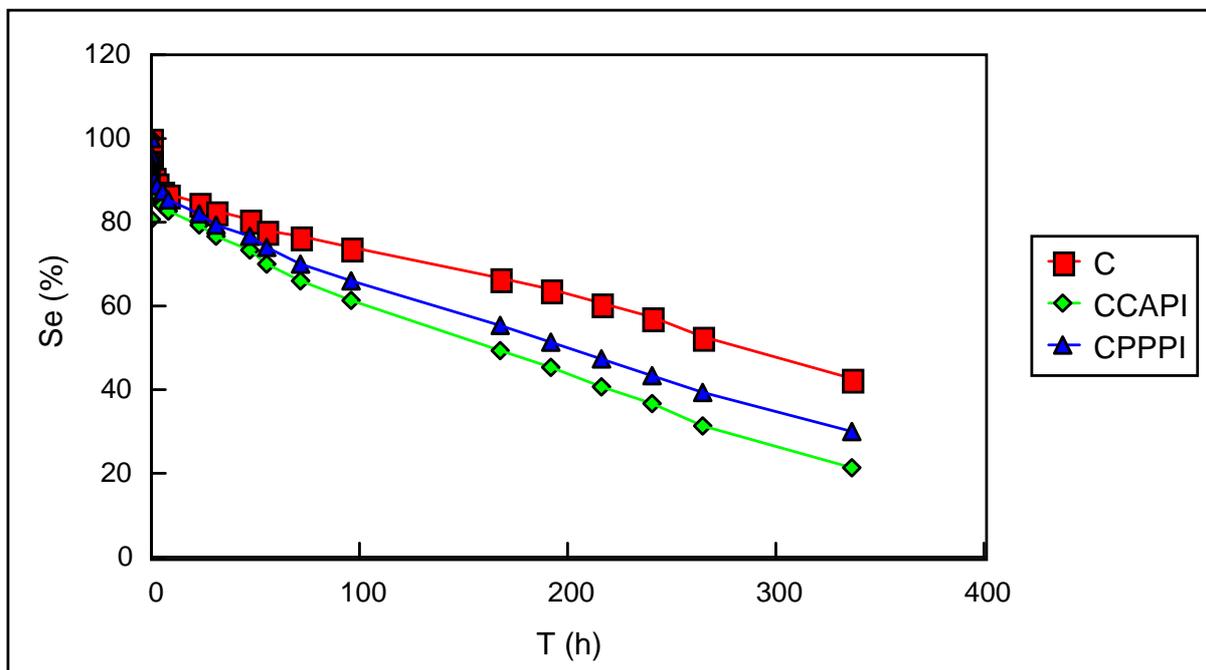


Figura 65. Desorción de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.

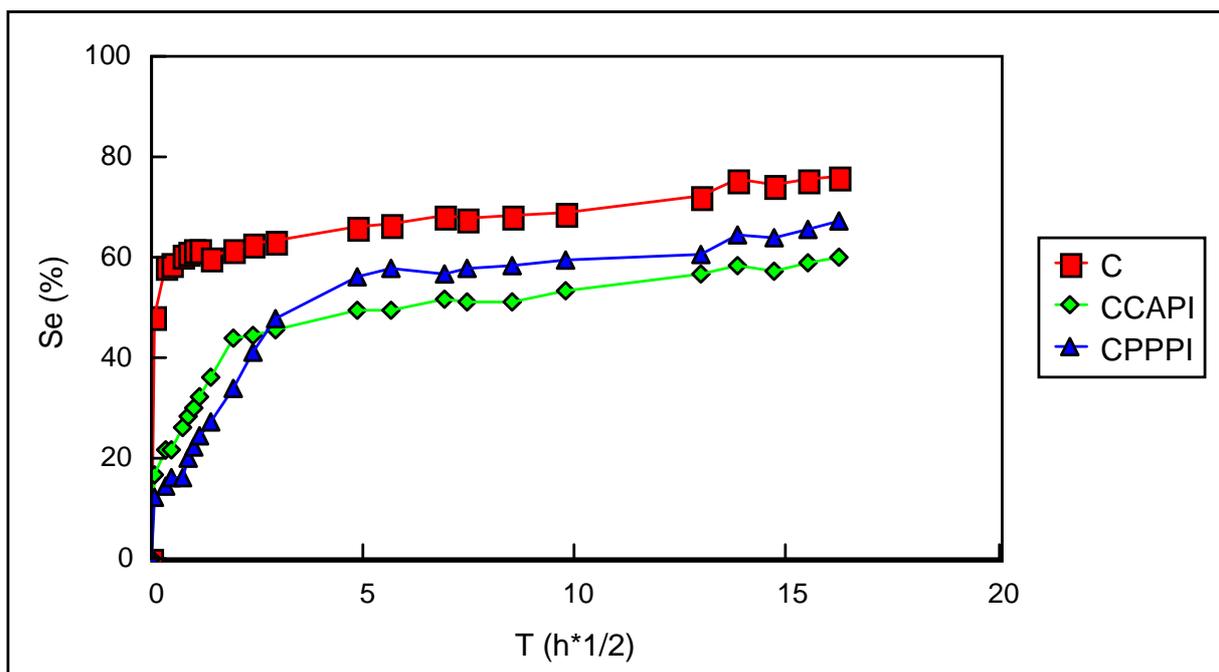


Figura 66. Absorción libre de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.

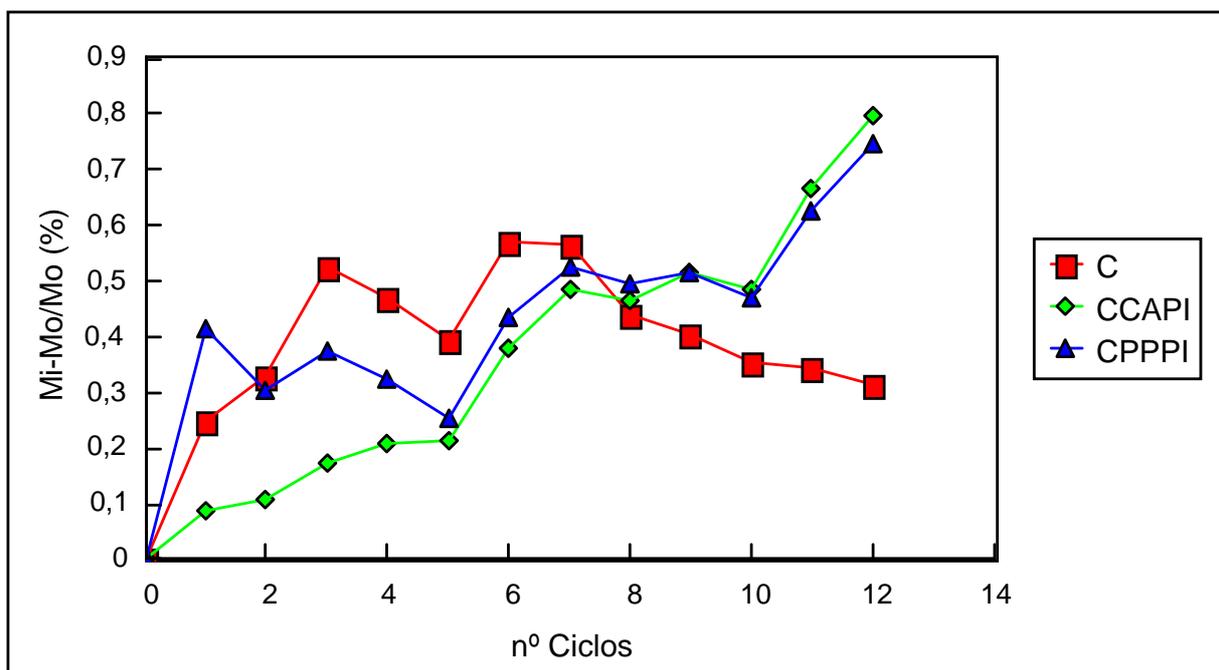
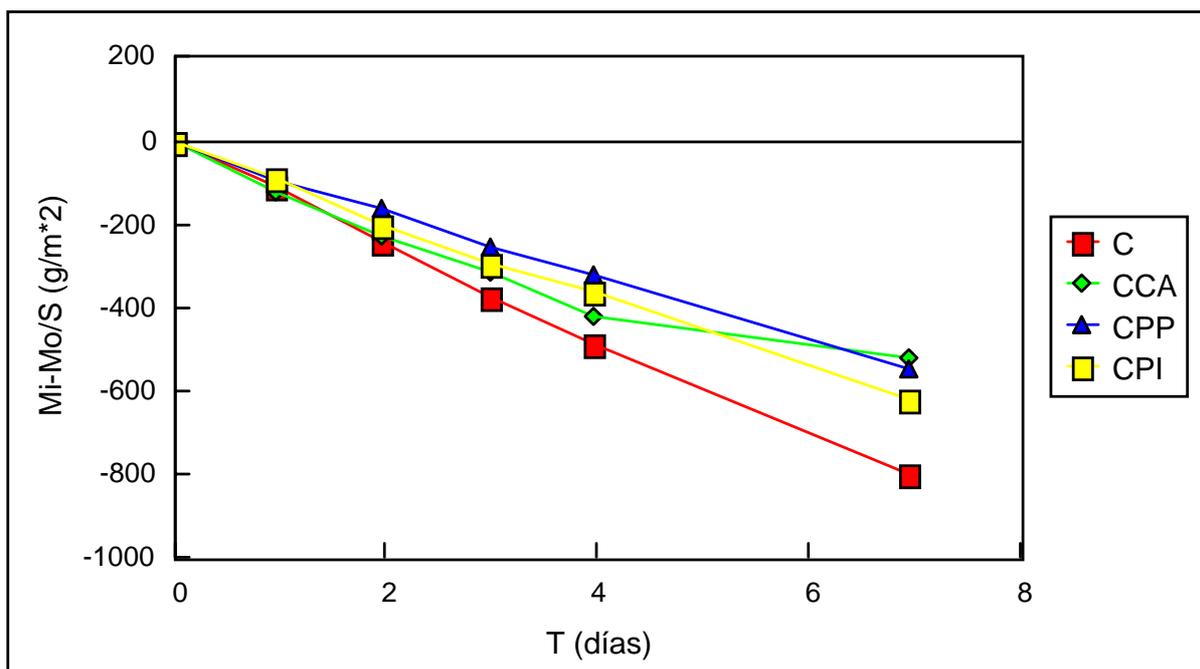


Figura 67. Cristalización de sales de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.



**Figura 68.** Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Begoña, sin tratar y tratada.

## 6.6 Arenisca de Montjuïc

### 6.6.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 19 se presentan los parámetros de caracterización petrográfica obtenidos para este tipo de roca sin tratar y una vez tratada por las 4 caras. También se puede observar la variación de masa de las probetas tras envejecimiento artificial acelerado, tanto mediante el ensayo de cristalización de sulfato sódico, como el de hielo - deshielo.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ sal (%)	$\nabla m$ hielo (%)
<b>Mo</b>	17,79	8,34	4,28	3,51	72,57	0,12	0,07
<b>Mo CAPI</b>	17,35	8,11	2,82	2,82	75,31	0,14	0,01
<b>Mo CFPI</b>	17,76	8,29	3,23	2,38	73,58	0,06	0,03
<b>Mo TVTC</b>	17,57	8,25	2,61	2,63	79,14	0,06	0

**Tabla 19.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Montjuïc (Mo) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI), Consistone FS y Parrogum Invisible (CFPI), y Tegovakon V y Tegosivin HL100 (TVTC), por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado, tanto por cristalización de sales como de hielo.

La porosidad, así como el contenido de agua absorbido en condiciones de vacío, de las probetas tratadas son inferiores a los de las probetas sin tratar, aunque esta reducción es del orden de 1%. El tratamiento que menos modifica estas propiedades es el CFPI.

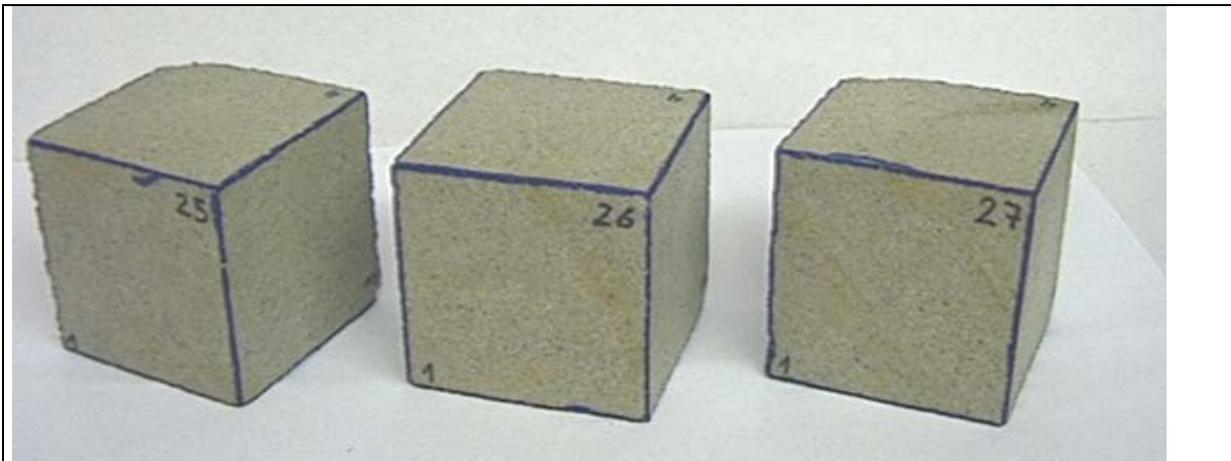
En los tres casos se observa una reducción en la velocidad de succión de agua por capilaridad (ver figura 69). Las probetas tratadas con los dos grupos de productos CAPI y TVTC reducen el coeficiente de capilaridad del orden del 35%; las probetas tratadas con CFPI lo reducen un 24%.

También se aprecia que las probetas tratadas, tras el ensayo de desorción, retienen menos cantidad de agua que las probetas sin tratar, siendo las probetas tratadas con CFPI las que más cantidad de agua desorben (ver figura 70).

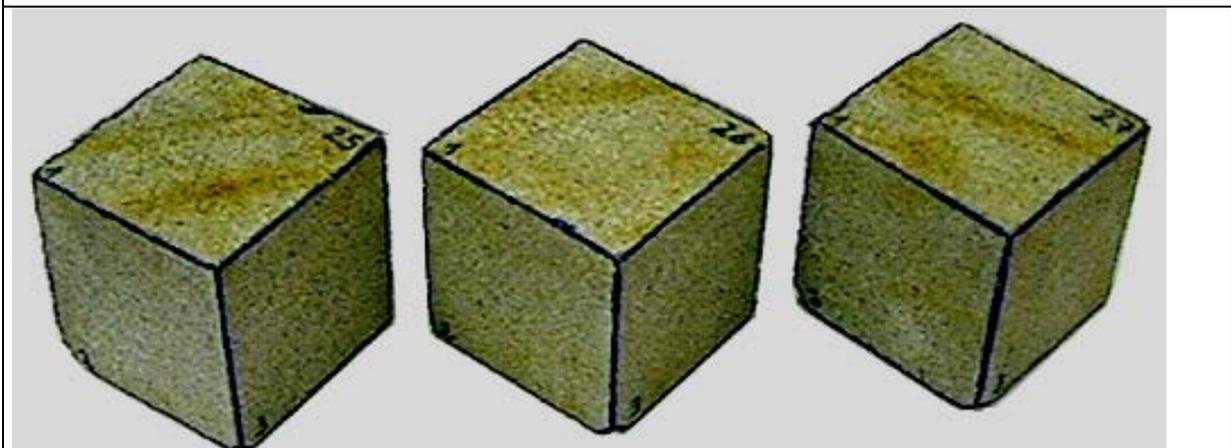
Todas las probetas tratadas llegan a valores de saturación en condiciones ambientales similares, aunque ligeramente superiores, al de las probetas sin tratar, y lo hacen a un ritmo semejante al de las probetas sin tratar (ver figura 71).

Las probetas sin tratar y tratadas, tras el ensayo de cristalización de sales, no experimentan pérdidas de peso apreciables (ver figura 72), y los síntomas de alteración son mínimos (ver fotos 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75 y 76). Si bien se puede observar un ligero picado en las probetas sin tratar a partir del 5º ciclo, en las probetas tratadas este picado no se observa hasta el 8º ciclo, siendo mucho más leve y sólo se produce en las caras no tratadas. Cabe remarcar

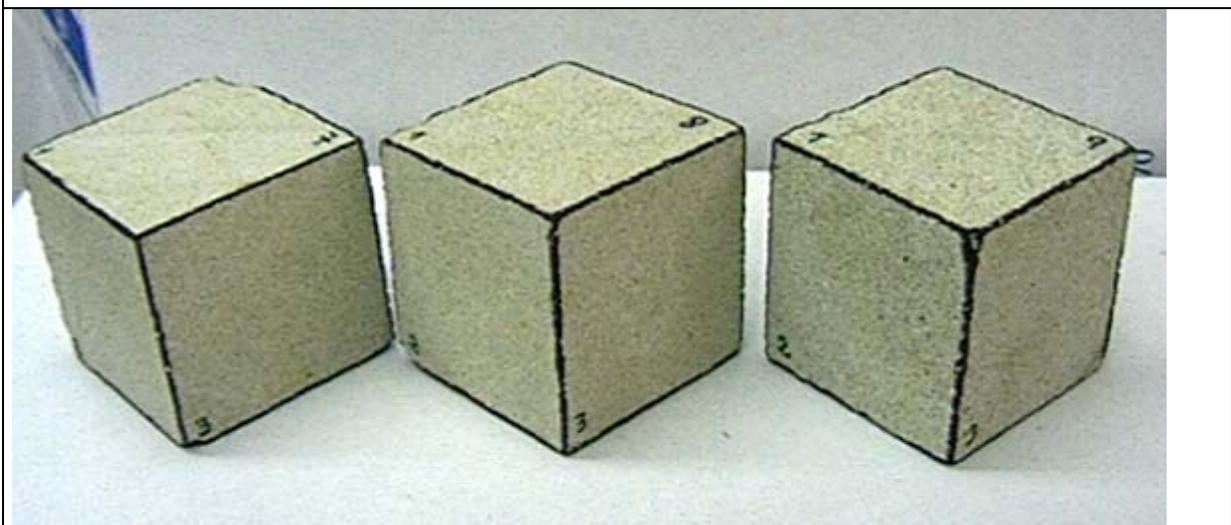
que, tanto las probetas tratadas como las sin tratar, tras el ensayo presentan una coloración rojiza en algunos niveles estratigráficos.



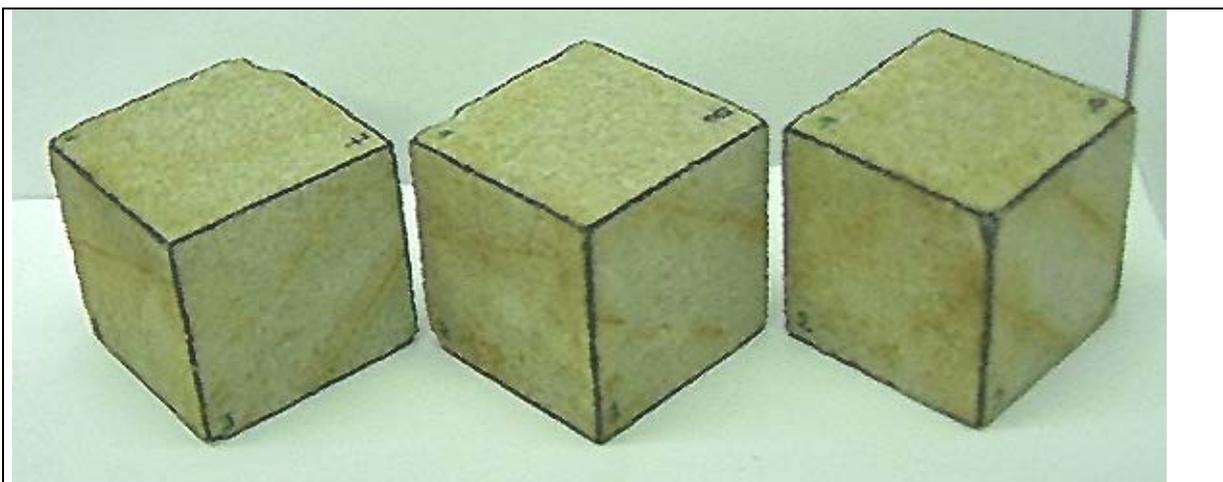
**Foto 69.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.



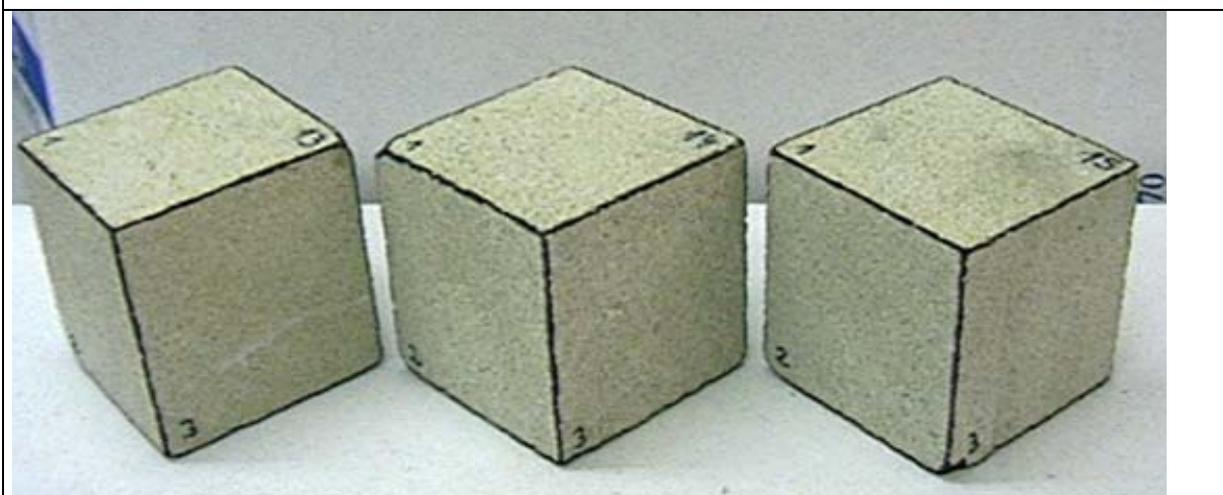
**Foto 70.** Probetas sin tratar, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.



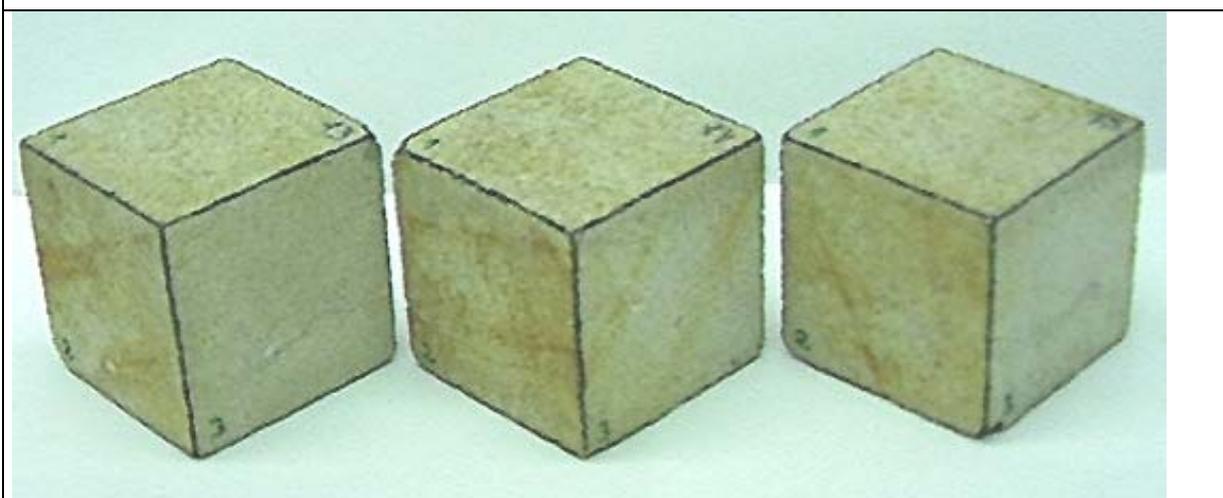
**Foto 71.** Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.



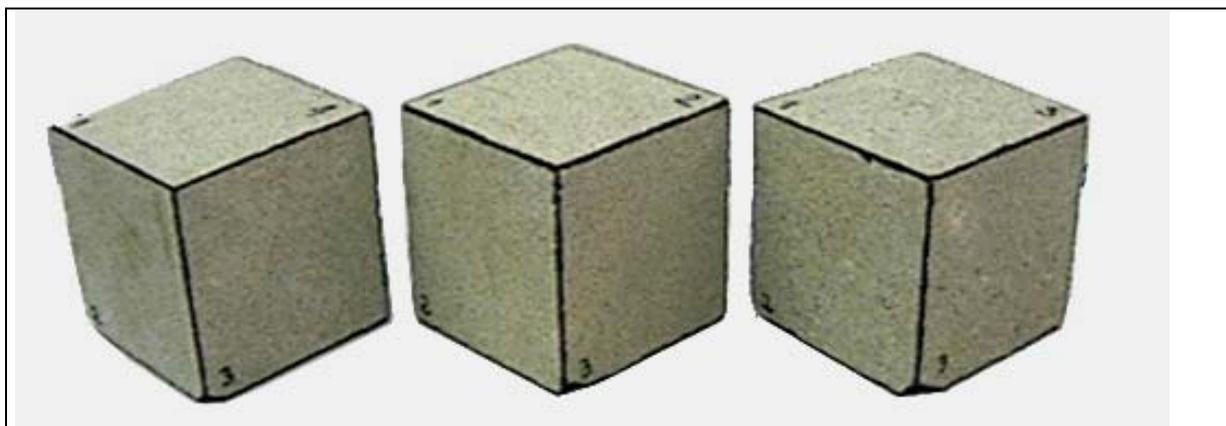
**Foto 72.** Probetas tratadas con CAPI, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.



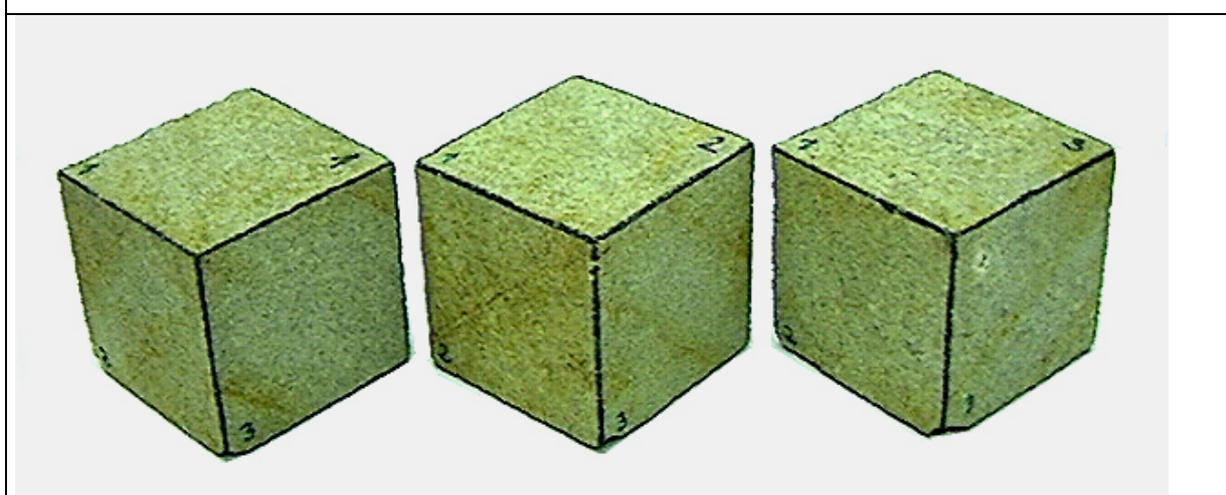
**Foto 73.** Probetas tratadas con CFPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 74.** Probetas tratadas con CFPI, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.

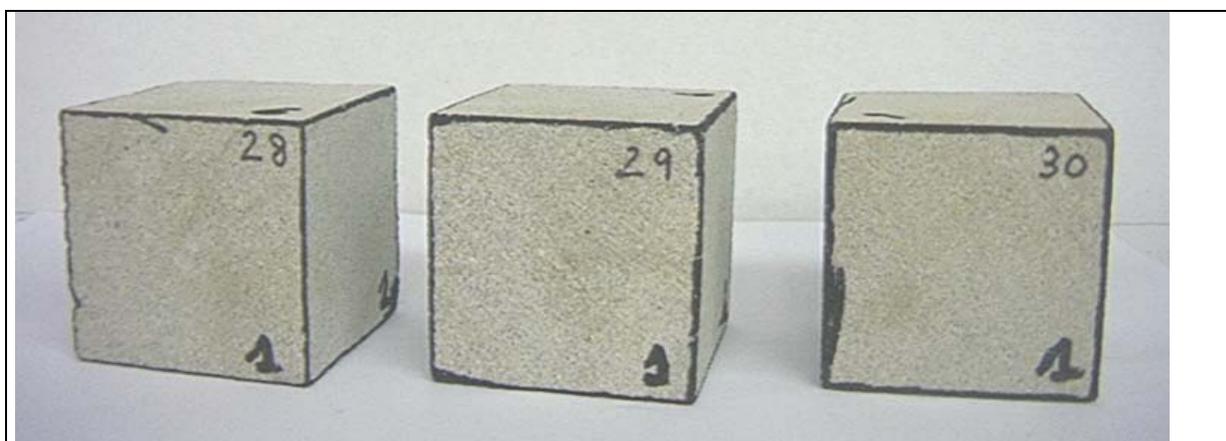


**Foto 75.** Probetas tratadas con TVTC, antes de ser envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.

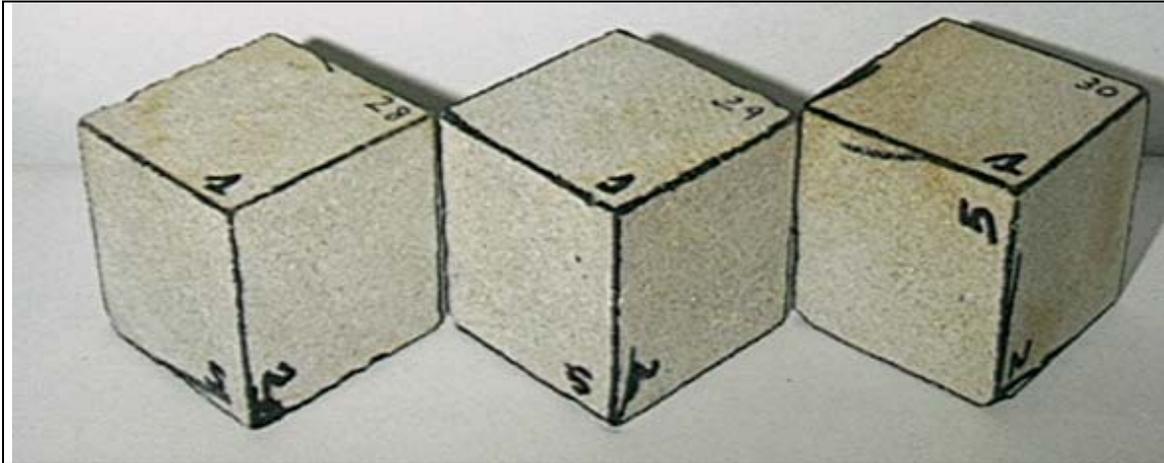


**Foto 76.** Probetas tratadas con TVTC, envejecidas tras el ensayo de cristalización de sales, de la Arenisca de Montjuïc.

Las probetas sin tratar y tratadas, tras el ensayo de hielo - deshielo, no experimentan pérdidas de peso apreciables, y los síntomas de alteración son casi nulos (ver fotos 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83 y 84). También en este caso se observa que todas las probetas presentan una coloración rojiza en algunos niveles estratigráficos tras el ensayo.



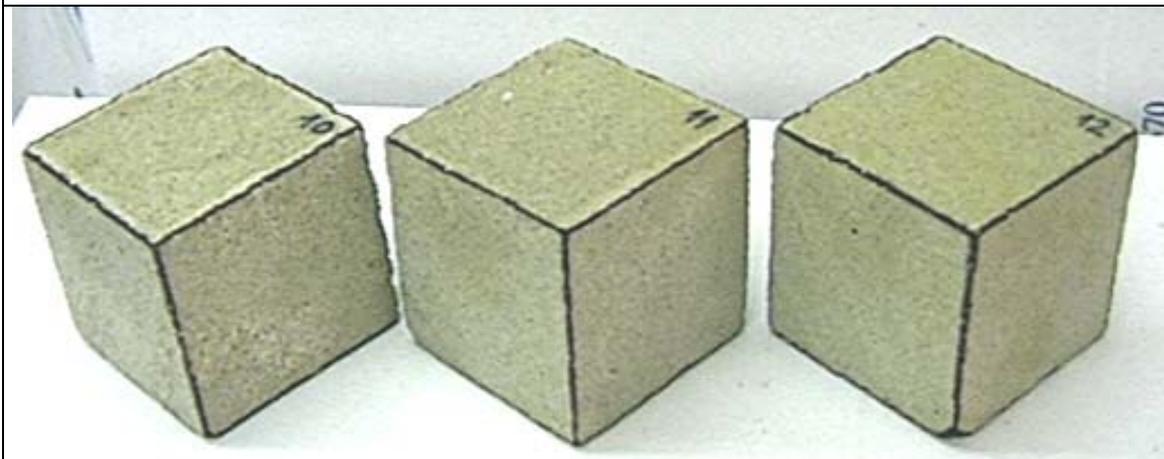
**Foto 77.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo - deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



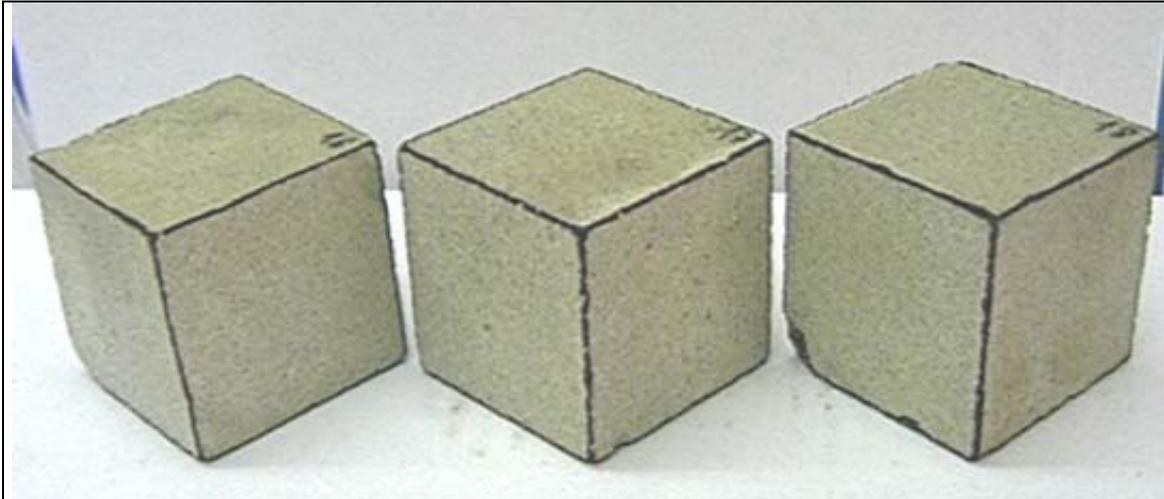
**Foto 78.** Probetas sin tratar, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



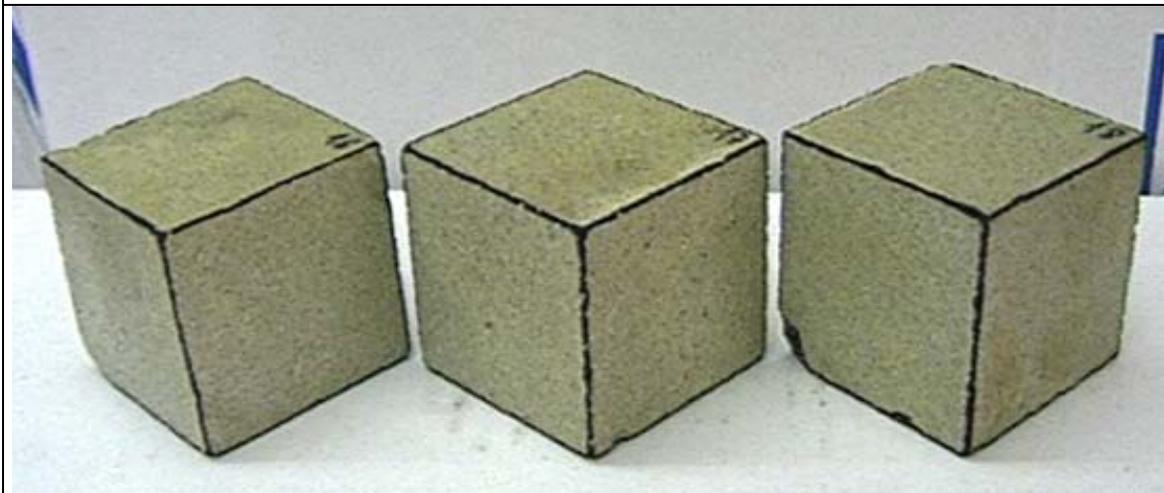
**Foto 79.** Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



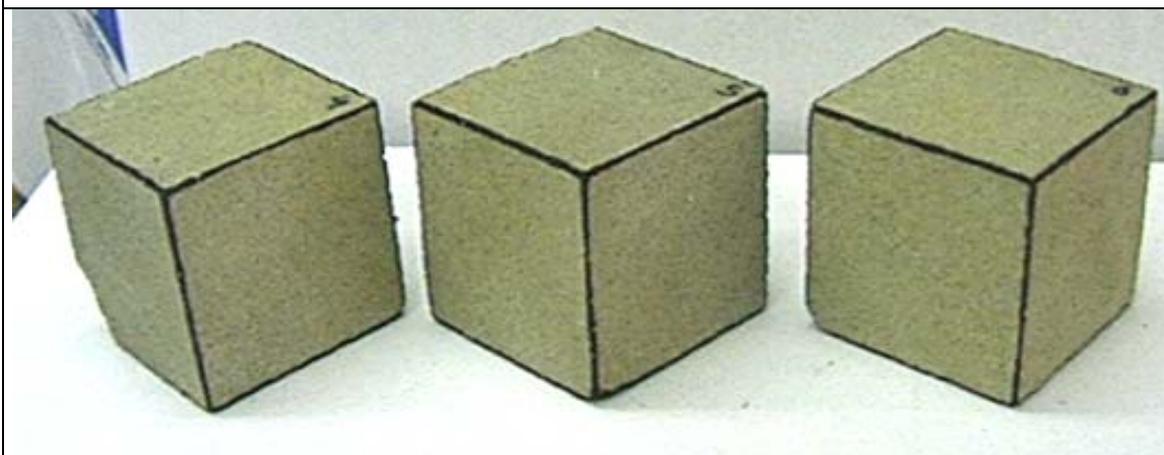
**Foto 80.** Probetas tratadas con CAPI, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



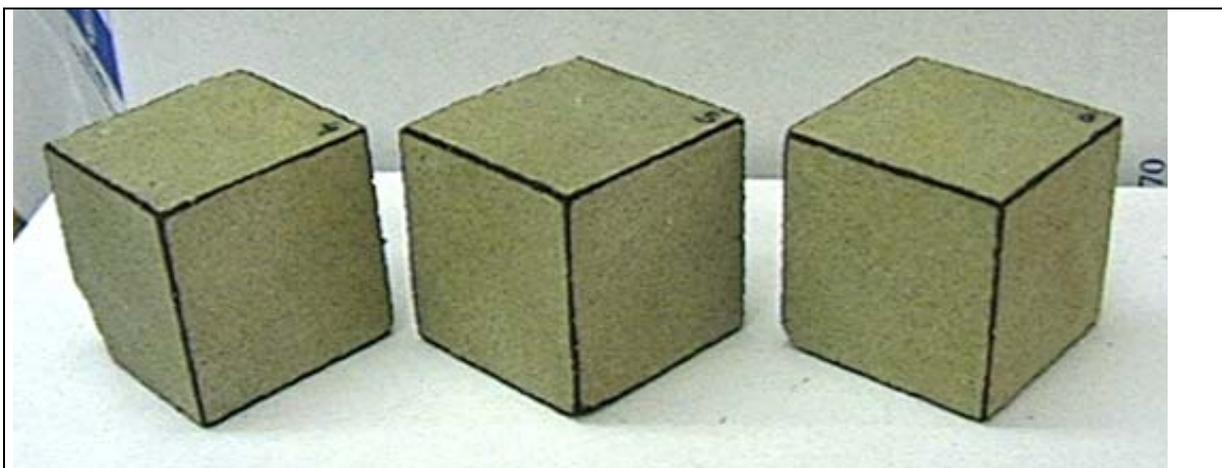
**Foto 81.** Probetas tratadas con CFPI, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 82.** Probetas tratadas con CFPI, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 83.** Probetas tratadas con TVTC, antes de ser envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.



**Foto 84.** Probetas tratadas con TVTC, envejecidas tras el ensayo de hielo – deshielo, de la Arenisca de Montjuïc.

En la Tabla 20 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de roca, antes y después de ser tratada con los tratamientos conservativos (consolidante e hidrofugante a la vez). En la figura 73 se representan gráficamente estos valores.

	<b>Kv' (g/(m<sup>2</sup>*24h))</b>
<b>Mo</b>	72
<b>MoCAPI</b>	54,3
<b>MoCFPI</b>	50,6
<b>MoTVTC</b>	49,2

**Tabla 20.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de la arenisca de Begoña (C) tratada con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tres tratamientos han reducido el valor de la permeabilidad.

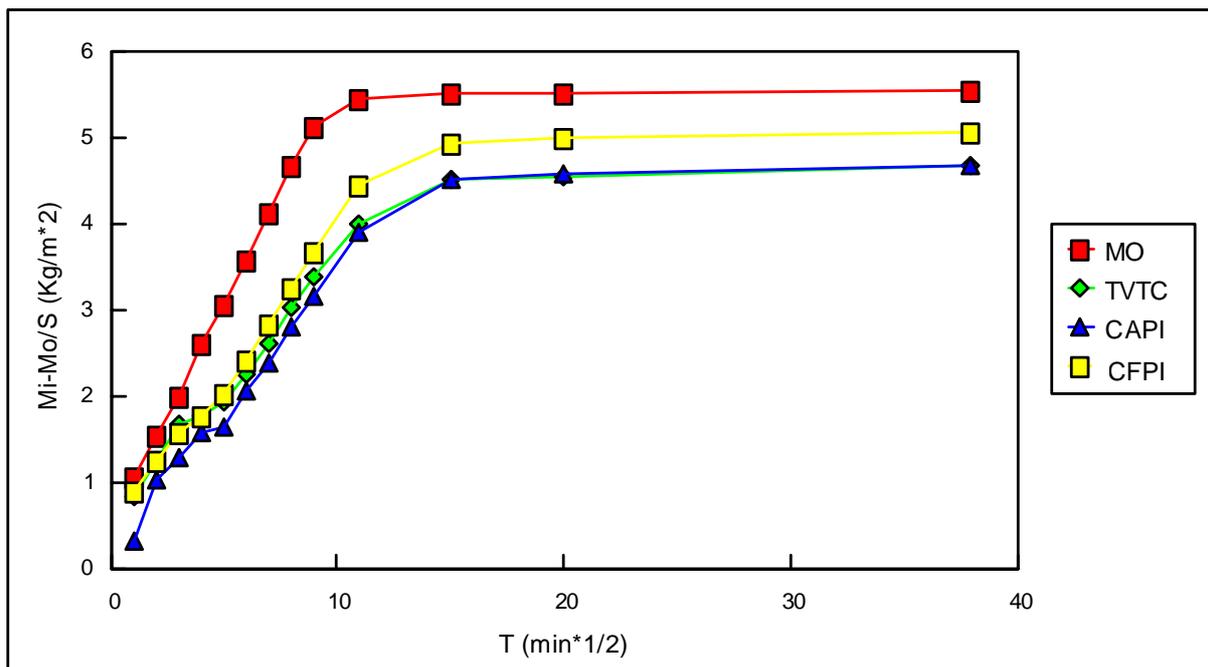
El tratamiento conservativo que menos ha modificado esta propiedad es el CAPI.

### 6.6.2 Comentarios

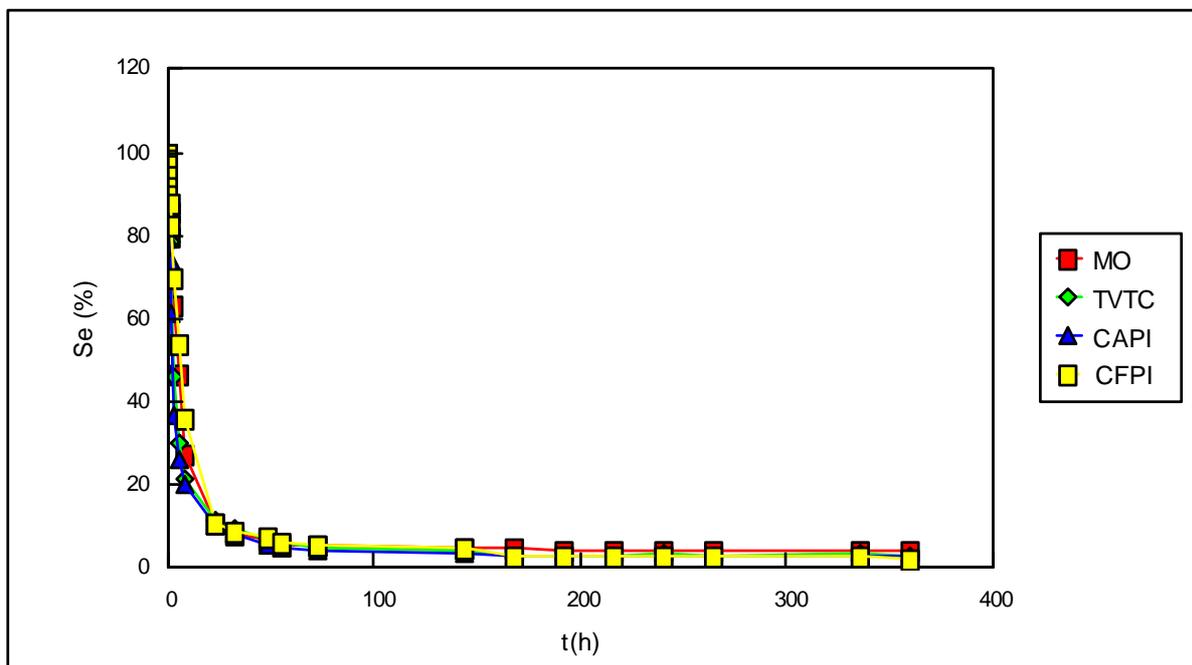
Las variaciones en las propiedades petrofísicas de este tipo de roca que se producen, al ser tratada con los diferentes tratamientos conservativos aquí estudiados, son muy similares en los tres casos, aunque el tratamiento que menos modificaciones ha conferido a la roca es el CFPI.

Cabe remarcar que tras los ensayos de envejecimiento artificial realizados las probetas han adquirido una tonalidad rojiza. Este hecho se explica por la oxidación del cemento ferruginoso que contiene esta roca.

De hecho, en Barcelona hay multitud de edificios que han sufrido esta oxidación después de haber sido limpiados con agua a presión.



**Figura 69.** Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.



**Figura 70.** Desorción de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.

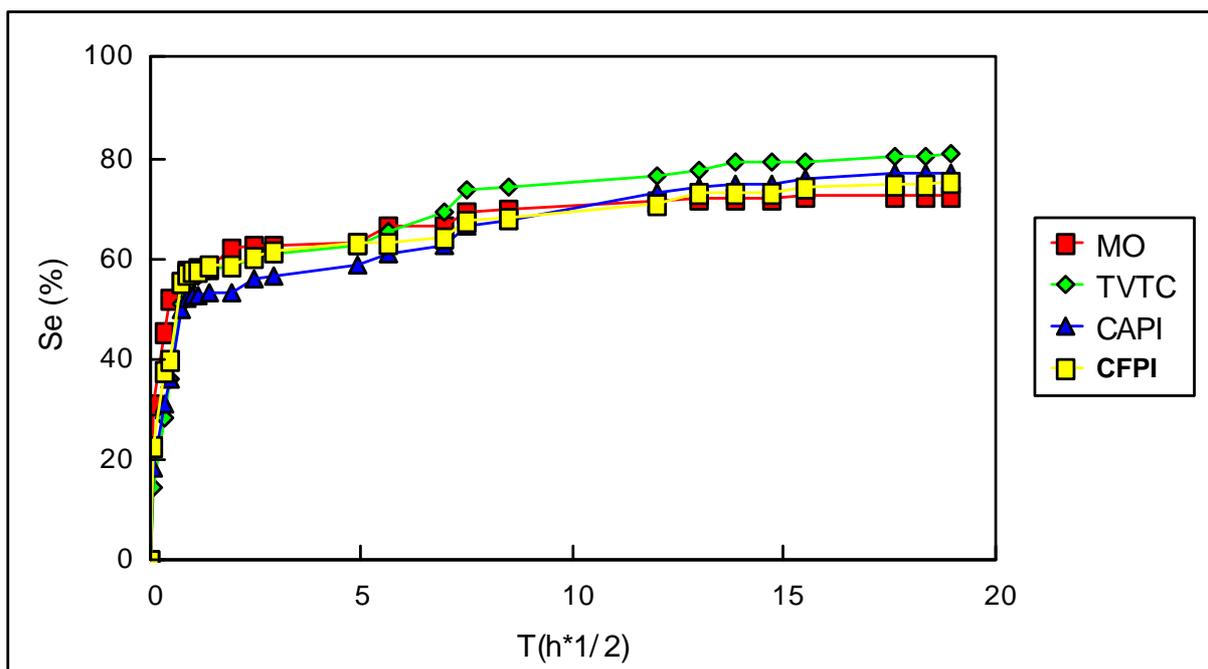


Figura 71. Absorción libre de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.

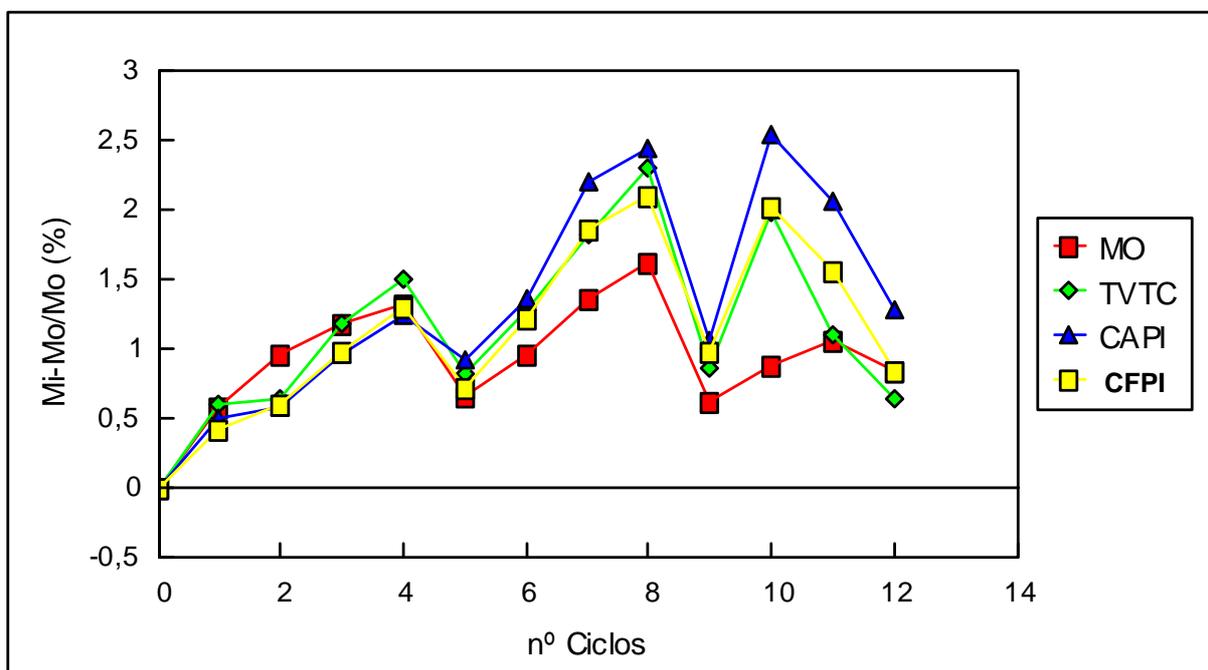
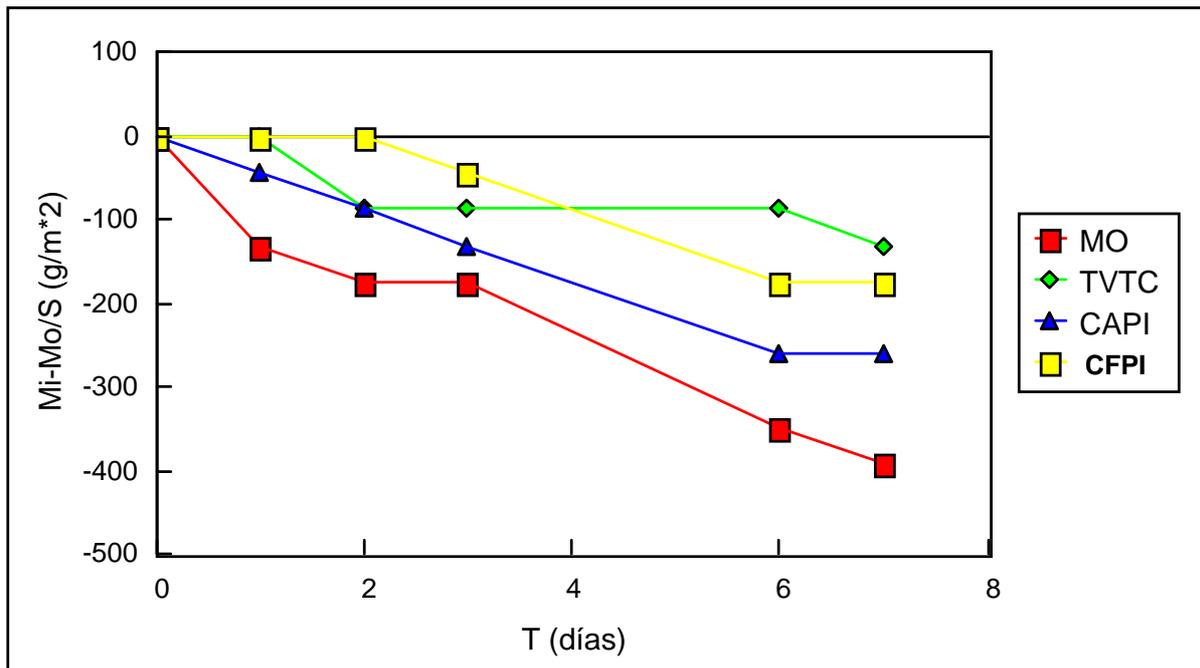


Figura 72. Cristalización de sales de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.



**Figura 73.** Permeabilidad al vapor de agua de la Arenisca de Montjuïc, sin tratar y tratada.

## 6.7 Parrot's Mix n°4

### 6.7.1 Propiedades petrofísicas y envejecimiento artificial acelerado

En la Tabla 21 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca artificial sin tratar y una vez tratada por las 4 caras, así como la variación de masa de las probetas tras el envejecimiento artificial acelerado mediante el ensayo de cristalización de sulfato sódico.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m h}^{2/1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)	$S_A$ FINAL (%)	$\nabla m$ (%)
<b>M</b>	47,49	64,04	0,22	35,00	48,00	-4,90
<b>M CAPI</b>	50,39	63,82	0,58	87,59	49,89	-6,51
<b>M PPPI</b>	51,08	64,49	0,61	92,30	47,15	-6,95

**Tabla 21.** Propiedades petrofísicas de Parrot's Mix n°4 (M) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI), por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción;  $S_A$  FINAL: grado de saturación final absorbido en condiciones ambientales;  $\nabla m$ : pérdida porcentual de masa tras envejecimiento artificial acelerado.

Parrot's Mix n°4 experimenta un aumento de un 6,5% de su porosidad libre al ser tratado con los productos estudiados.

Cabe señalar que, aunque las probetas tratadas con CAPI presentan una porosidad superior al de las probetas sin tratar, absorben menos agua en condiciones de vacío, siendo éste un comportamiento anómalo.

En los dos casos, se observa un incremento superior al 22% en el coeficiente de succión por capilaridad (ver figura 74) en las probetas tratadas, respecto a las probetas sin tratar.

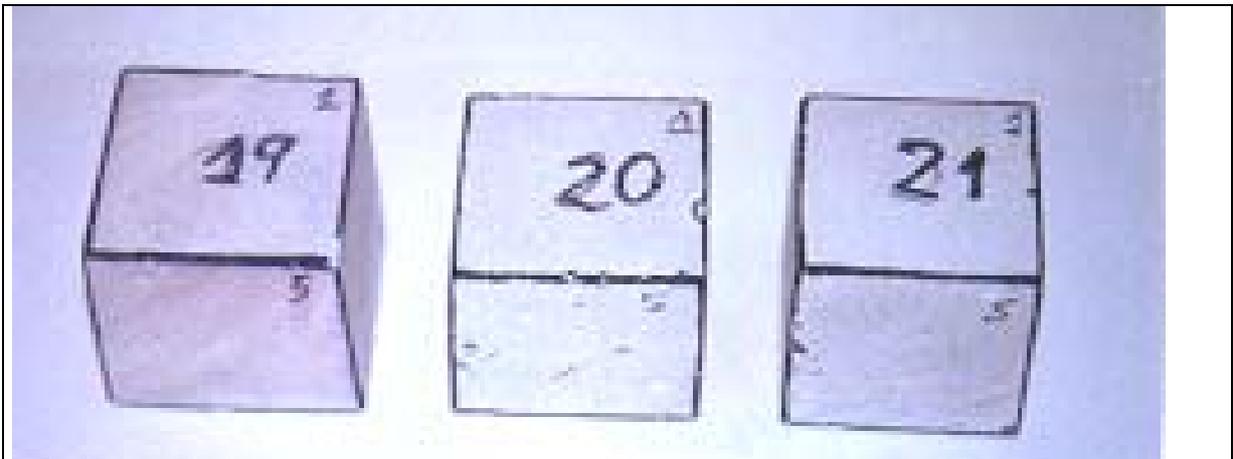
También se aprecia que las probetas tratadas, tras el ensayo de desorción, retienen mucha más cantidad de agua que las probetas sin tratar (ver figura 75), perdiendo menos del 20% del agua absorbida en condiciones de vacío.

Las probetas tratadas con CAPI absorben un 4% más de agua, en condiciones ambientales, que las probetas sin tratar, y las tratadas con PPPI absorben un 2% menos que las probetas sin tratar (ver figura 76).

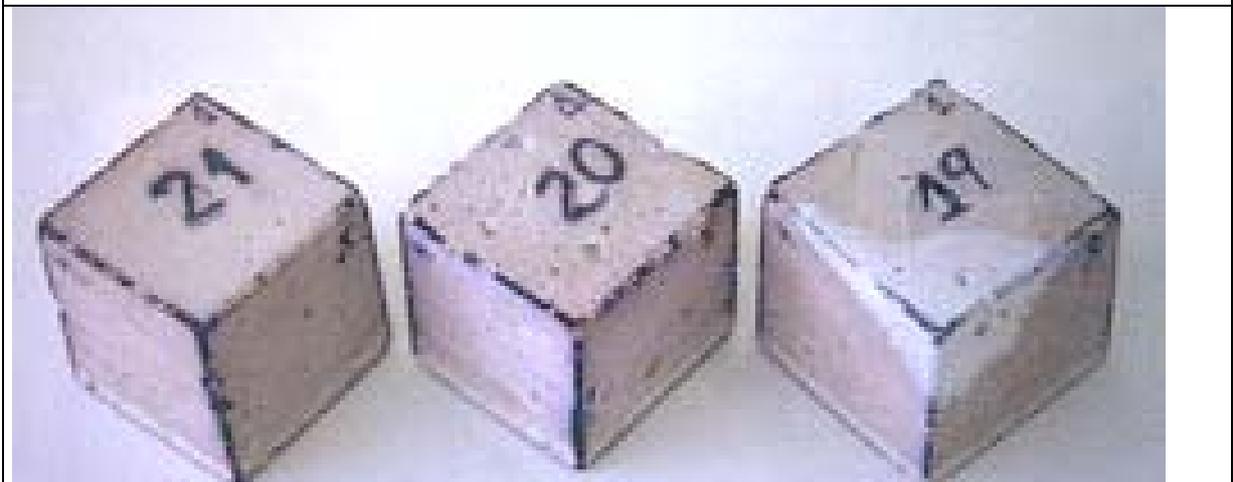
Todos estos datos sugieren que los productos de tratamiento conservativo están afectando de forma anómala la movilidad del agua por la red porosa de este material.

Las probetas sin tratar y las tratadas, tras el ensayo de cristalización de sales, experimentan una ganancia de peso (ver figura 77). A partir del 3er ciclo, las probetas tratadas con PPPI se empiezan a agrietar, llegándose a formar grietas importantes al finalizar el ensayo.

En las probetas sin tratar se generan grietas incipientes a partir del 5° ciclo, y en las tratadas con CAPI se empiezan a generar en el ciclo 9, pero en cualquier caso estas grietas no llegan a hacerse más visibles al finalizar los 18 ciclos (ver fotos 85, 86, 87, 88, 89 y 90).



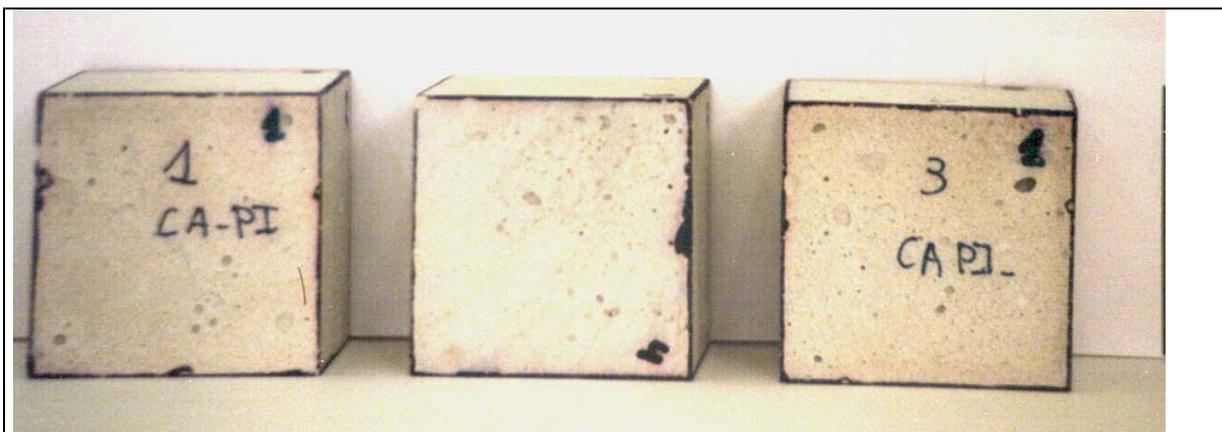
**Foto 85.** Probetas sin tratar, antes de ser envejecidas de Parrot's Mix 4.



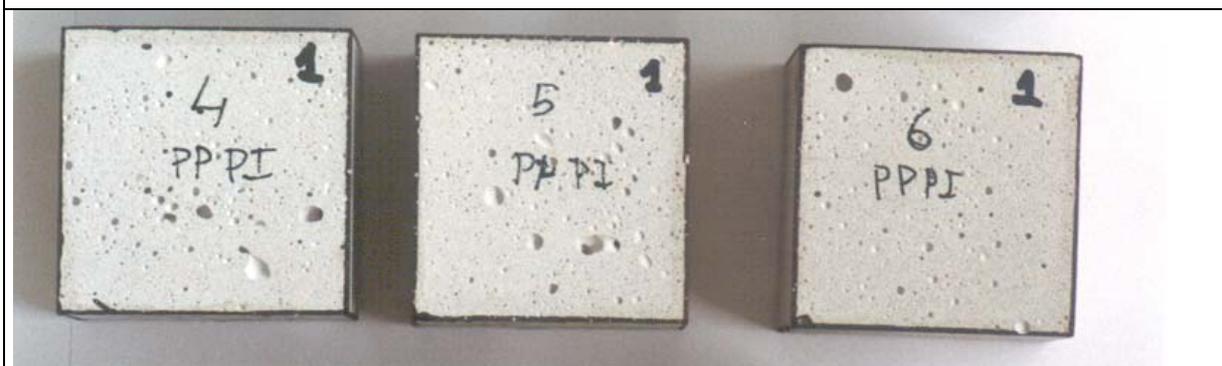
**Foto 86.** Probetas sin tratar, envejecidas de Parrot's Mix 4.



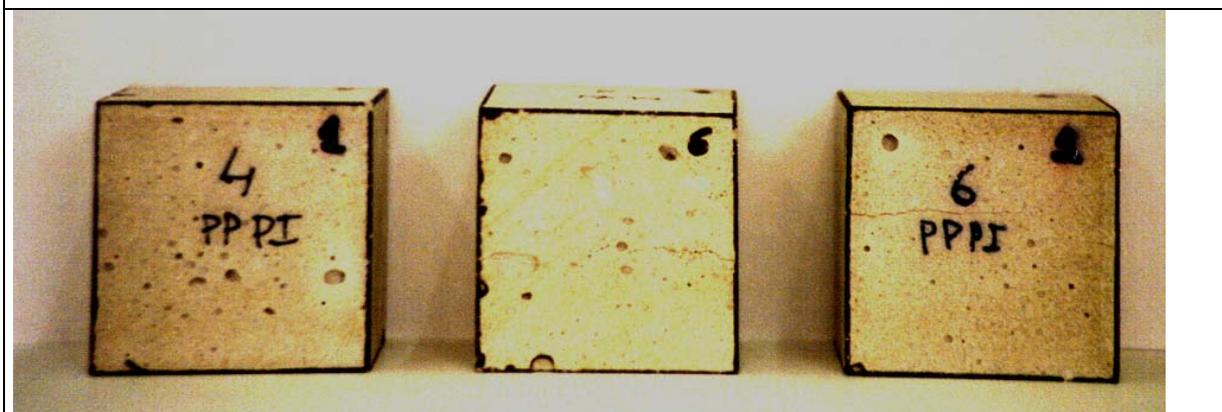
**Foto 87.** Probetas tratadas con CAPI, antes de ser envejecidas de Parrot's Mix 4.



**Foto 88.** Probetas tratadas con CAPI, envejecidas de Parrot's Mix 4.



**Foto 89.** Probetas tratadas con PPPI, antes de ser envejecidas de Parrot's Mix 4.



**Foto 90.** Probetas tratadas con PPPI, envejecidas de Parrot's Mix 4.

En la Tabla 22 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua para este tipo de material, antes y después de ser tratada con los productos conservativos. En la figura 78 se representan gráficamente estos valores.

	$K_v'$ (g/(m <sup>2</sup> *24h))
M	58,96
MCA	54,13
MPP	46
MPI	35,2

**Tabla 22.** Permeabilidad al vapor de agua, corregido el espesor, de Parrot's Mix n°4 (M) tratado con Consistone A, Plurifach P y Parrogum Invisible.

Como se puede observar, las probetas tratadas con los tres tratamientos han reducido el valor de la permeabilidad.

El tratamiento que menos ha modificado esta propiedad es el CA, habiéndose obtenido un valor muy similar al de las probetas sin tratar.

### **6.7.2 Comentario**

El aumento de la porosidad, así como la mayor velocidad de succión de agua de la roca artificial tratada se pueden relacionar con una modificación en la red porosa de la misma, produciéndose, posiblemente, una mejor conectividad entre las esférulas constituyentes y los canales de acceso del aglutinante.

Teniendo en cuenta que las esférulas actúan como a modo de esponja, dejando entrar el agua pero dificultando su salida, y que los tratamientos ensayados han dejado entrar mayor cantidad de agua, es lógico pensar que la desorción de las probetas tratadas sea inferior que la de las probetas sin tratar, y que se produzca un mayor incremento de masa al finalizar el ensayo de envejecimiento artificial.

Cabe remarcar que las probetas tratadas con PPPI se han figurado de forma importante tras el ensayo de envejecimiento, lo que hace desaconsejable la utilización de este producto en esta roca artificial.

Así pues, el tratamiento que menos modifica las propiedades petrofísicas de este material es el Consistone A y Parrogum Invisible.

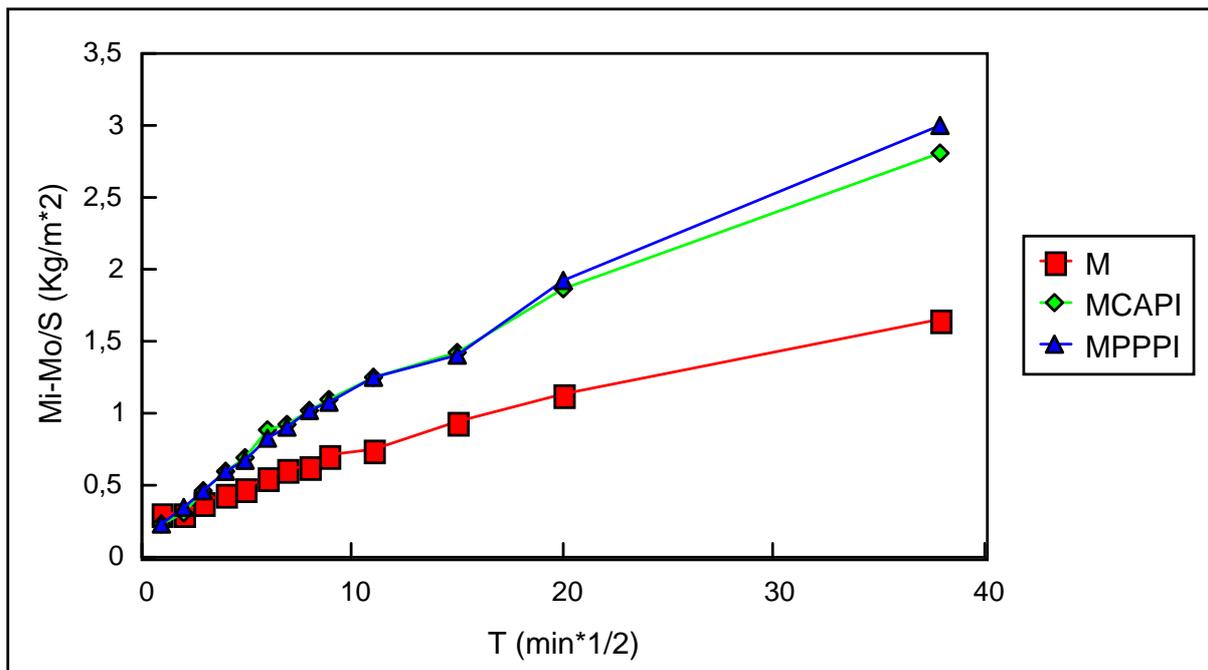


Figura 74. Succión capilar de Parrot's Mix n°4, sin tratar y tratada.

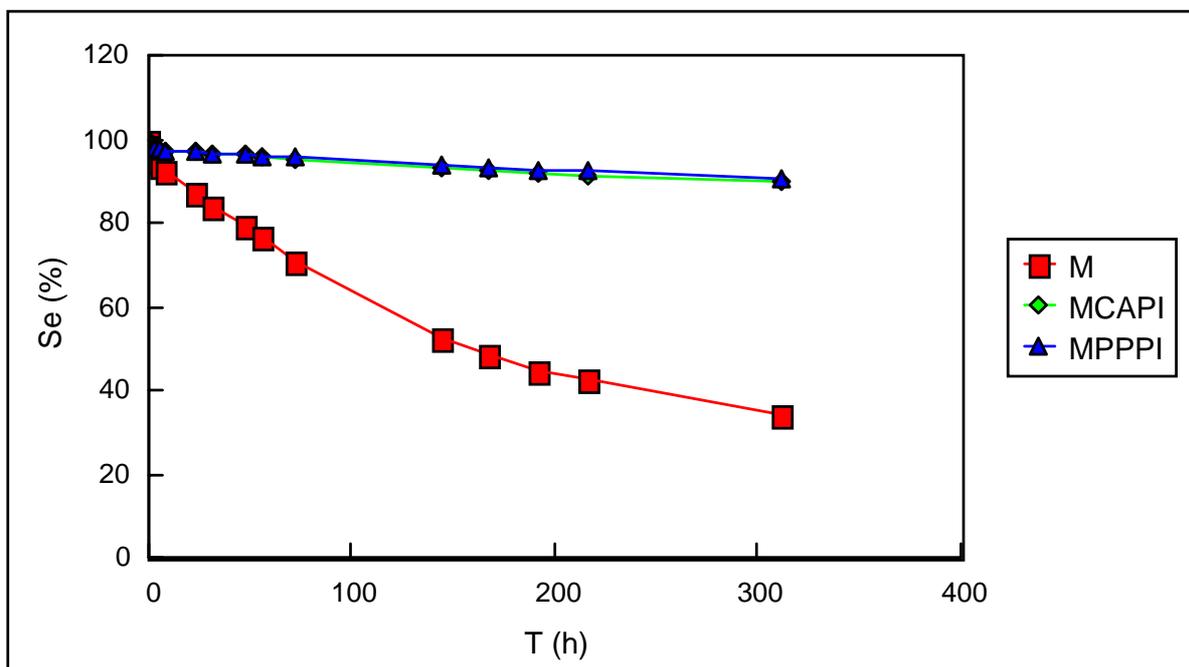


Figura 75. Desorción de Parrot's Mix n°4, sin tratar y tratada.

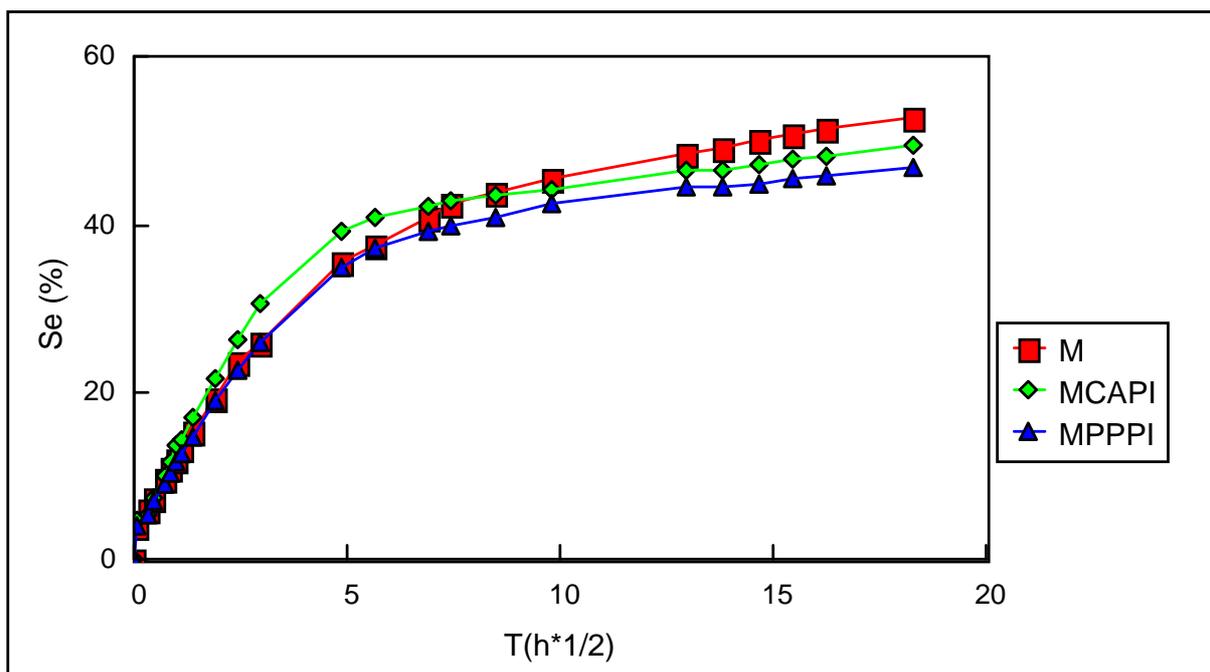


Figura 76. Absorción libre de Parrot's Mix n°4, sin tratar y tratada.

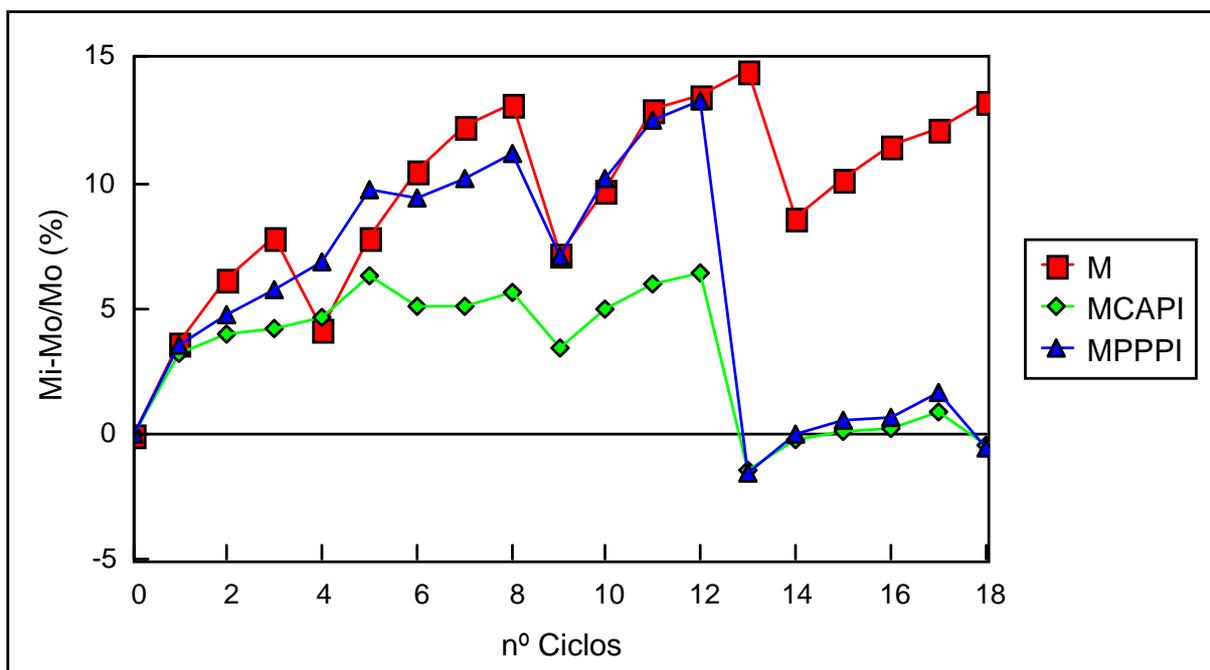
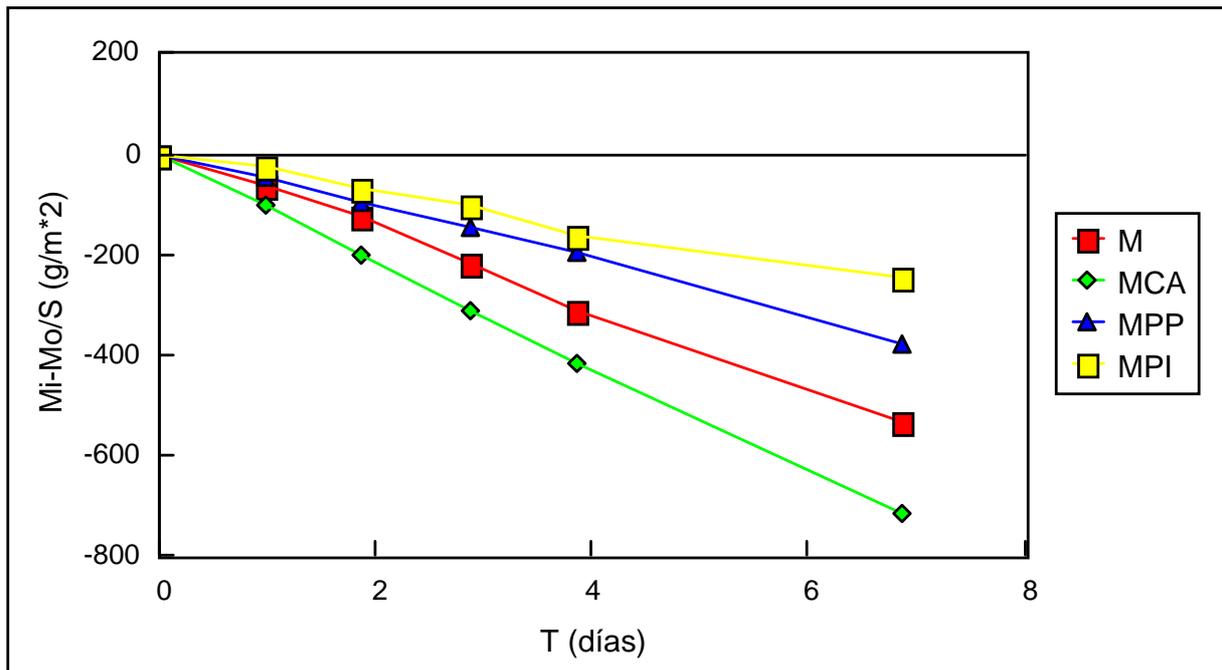


Figura 77. Cristalización de Parrot's Mix n°4, sin tratar y tratada.



**Figura 78.** Permeabilidad al vapor de agua de Parrot's Mix n°4, sin tratar y tratada.

## 7 MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS TRAS EL ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO

### 7.1 Arenisca del Figaró

#### 7.1.1 Propiedades petrofísicas

En la Tabla 23 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca, sin tratar y tratada con los productos conservativos, aplicados por 6 caras y por 4 caras, antes y después de someter las probetas al ensayo de envejecimiento artificial acelerado.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m}^2 \text{h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)
<b>F</b>	9,89	4,08	0,93	5,00
<b>F tras sal</b>	9,80	4,04	0,92	58,09
<b>FCAPI-6</b>	8,49	3,51	0,16	25,09
<b>FCAPI-6 tras sal</b>	7,97	3,28	0,12	21,48
<b>FCAPI-4</b>	10,61	4,44	0,84	57,94
<b>FCAPI-4 tras sal</b>	10,36	4,34	1,35	53,30
<b>FPPPI-6</b>	9,30	3,84	0,11	28,31
<b>FPPPI-6 tras sal</b>	8,36	3,45	0,11	17,85
<b>FPPPI-4</b>	9,32	3,85	0,67	63,59
<b>FPPPI-4 tras sal</b>	10,46	4,37	1,17	74,43

**Tabla 23.** Propiedades petrofísicas de la arenisca del Figaró (F) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI) por 6 y 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción.

La porosidad de las probetas tras el ensayo de envejecimiento artificial se ha reducido, a excepción de las probetas tratadas con PPPI por 4 caras, que ha experimentado un aumento del 12%. La cantidad de agua absorbida por las probetas presenta la misma variación que en el caso de la porosidad.

El coeficiente de absorción capilar de las probetas tratadas por 4 caras y envejecidas artificialmente aumenta más del 60% respecto al obtenido antes del envejecimiento para los dos tipos de tratamiento. El resto de las probetas experimentan una disminución de este coeficiente (ver figuras 79, 80, 81, 82 y 83), incluso en el caso de las probetas sin tratar.

Las probetas sin tratar, una vez envejecidas artificialmente retienen agua más de 10 veces que antes de ser alteradas; las tratadas con PPPI por 4 caras también experimentan un aumento, aunque mucho menor, del orden del 17%. El resto de probetas han retenido menos cantidad de agua que antes de ser envejecidas (ver figuras 84, 85, 86, 87 y 88).

### 7.1.2 Comentario

El envejecimiento artificial acelerado en las probetas sin tratar casi no ha modificado las propiedades de la roca, a excepción de la retención de agua, la cual ha aumentado mucho. Este hecho parece indicar que, si bien no se ha aumentado la porosidad, sí se ha modificado su red porosa interna, haciéndola más tortuosa y dificultando la salida de agua. Aunque este hecho también se puede relacionar con la presencia de sales solubles dentro de la red porosa, que absorban agua y la retengan.

Las probetas tratadas por las seis caras no han visto casi modificadas sus propiedades después del envejecimiento; esto corrobora que esta forma de tratar la roca impide que el agua, y en este caso las sales, entren en su red porosa y la modifiquen.

Las probetas tratadas por las cuatro caras y envejecidas que han visto menos afectadas sus propiedades son las tratadas con CAPI.

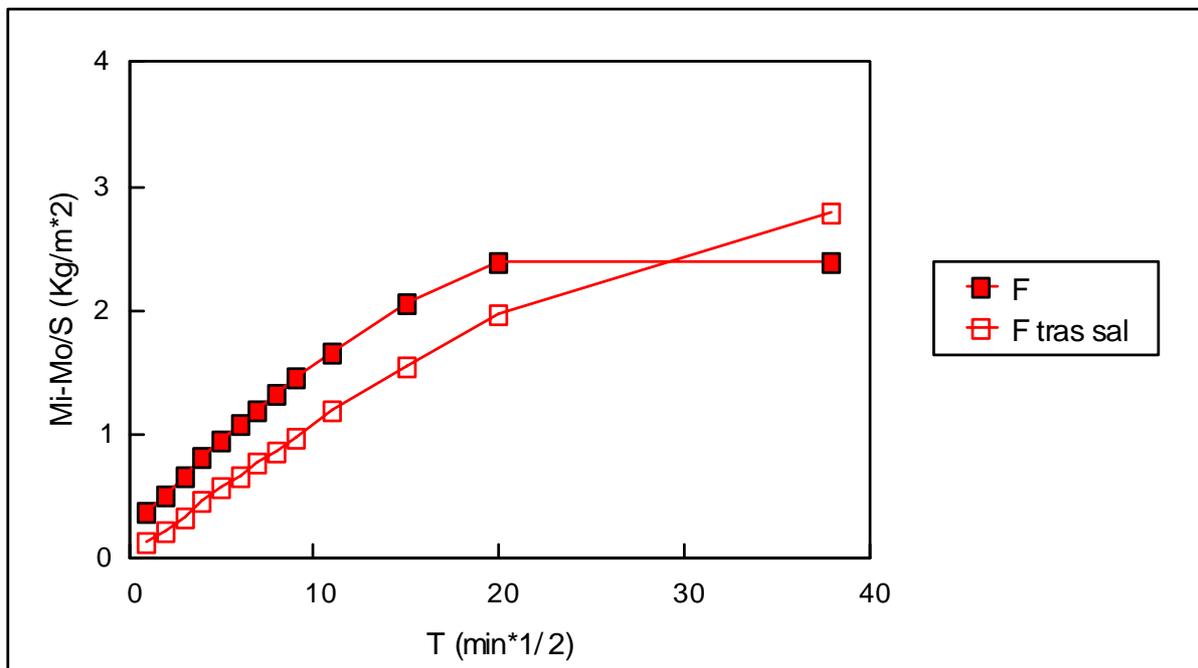


Figura 79. Succión capilar de la Arenisca del Figaró sin tratar, antes y después de sales.

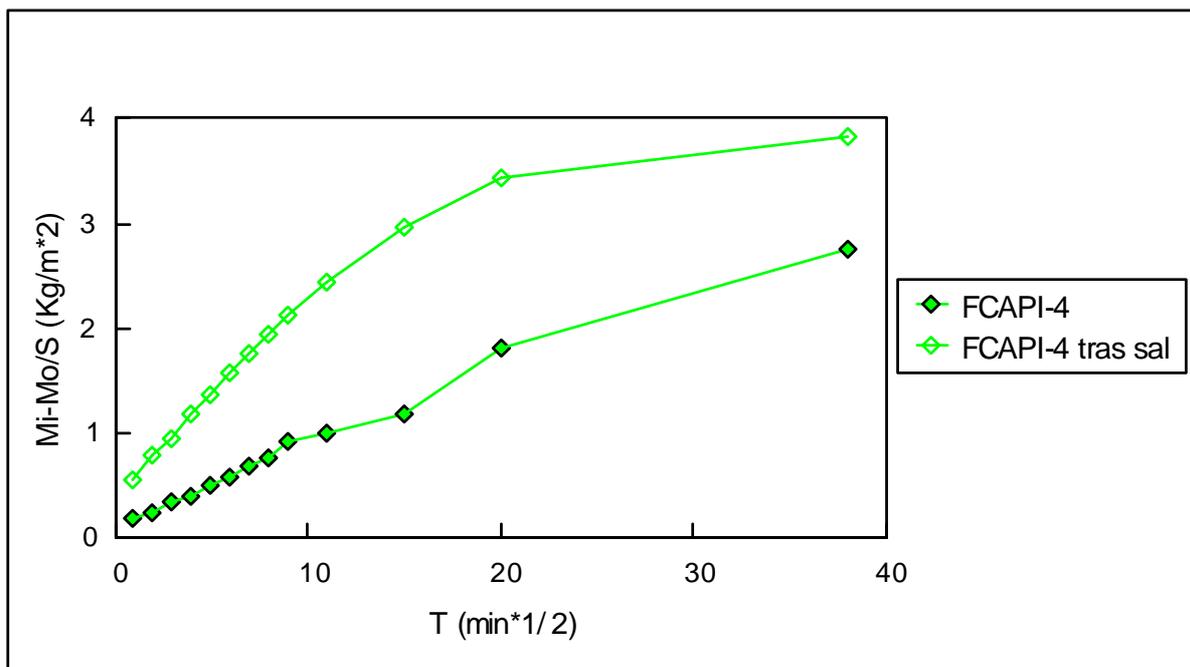


Figura 80. Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 4 caras, antes y después de sales.

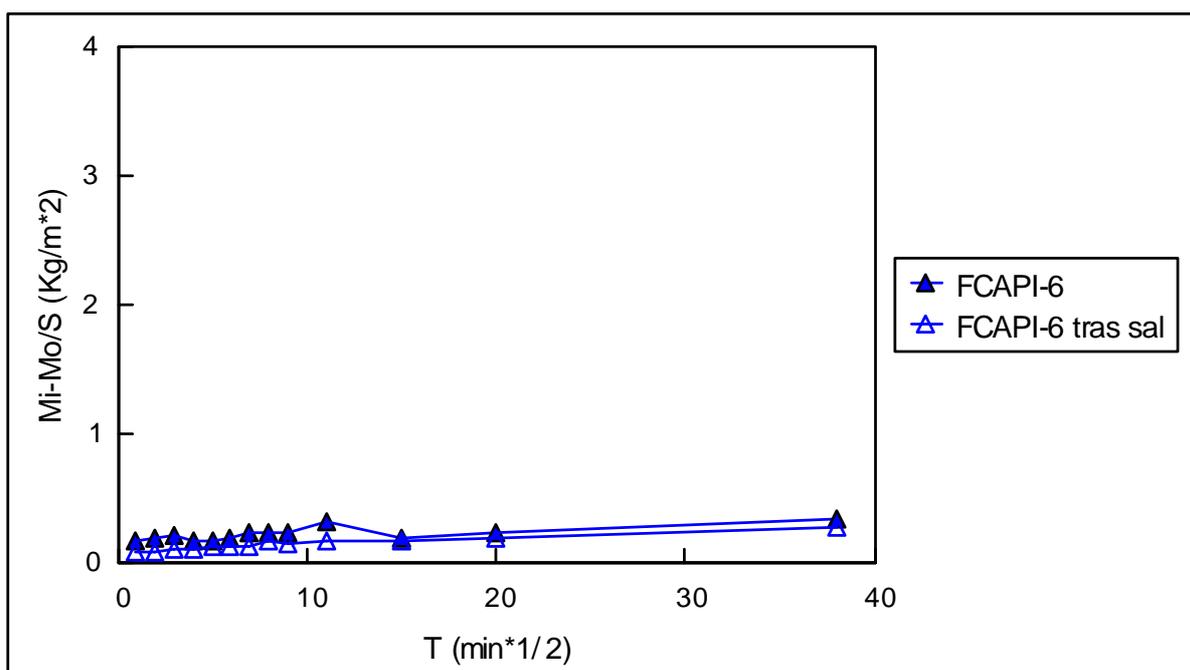


Figura 81. Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 6 caras, antes y después de sales.

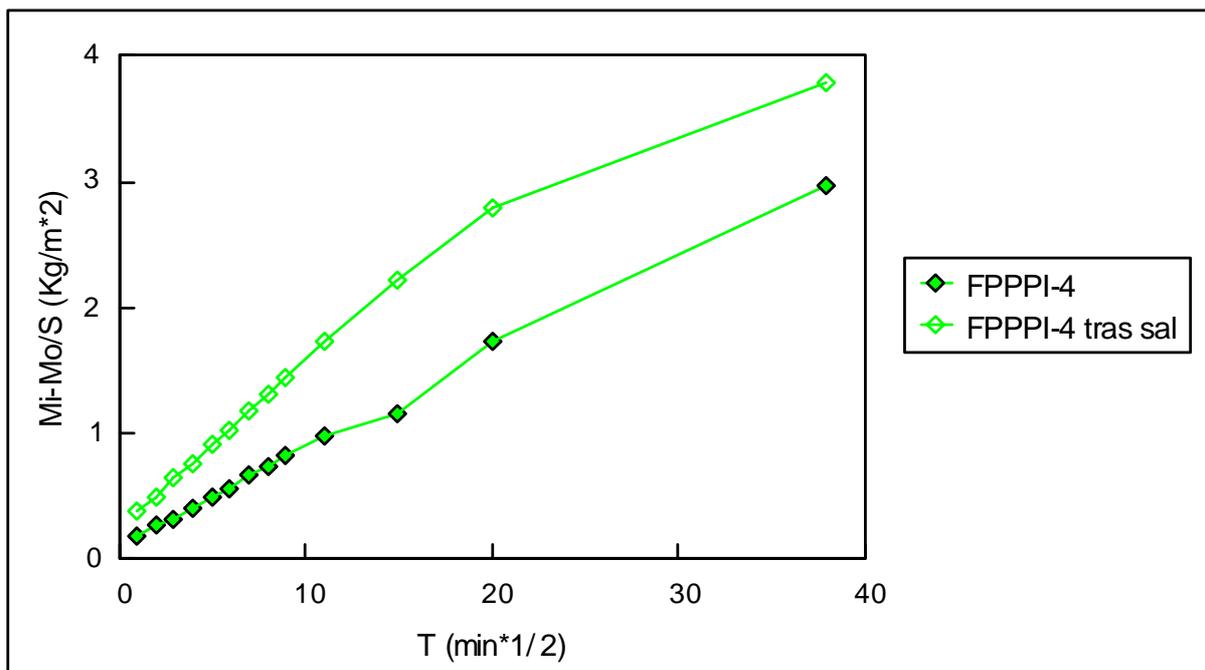


Figura 82. Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 4 caras, antes y después de sales.

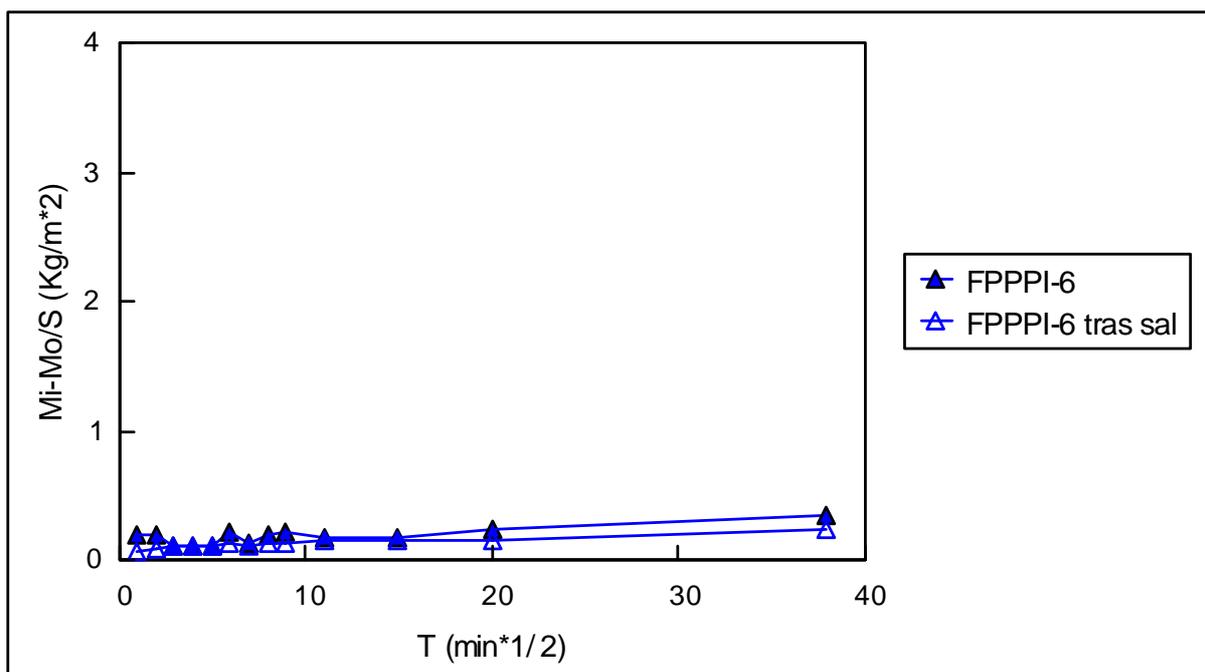
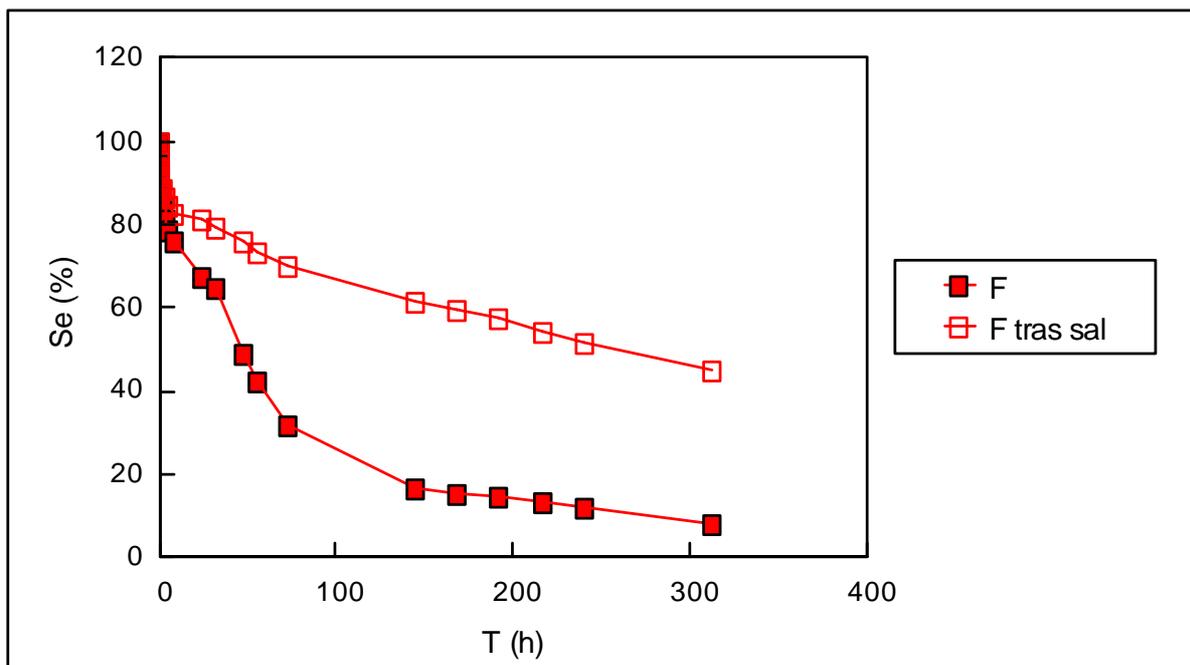
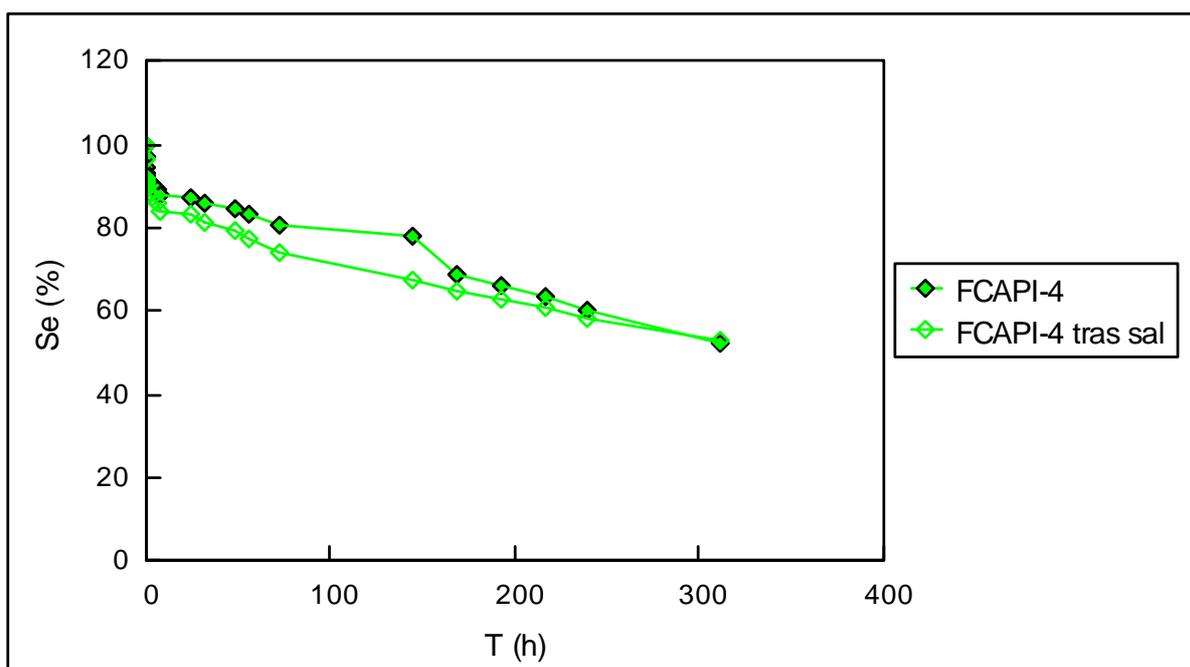


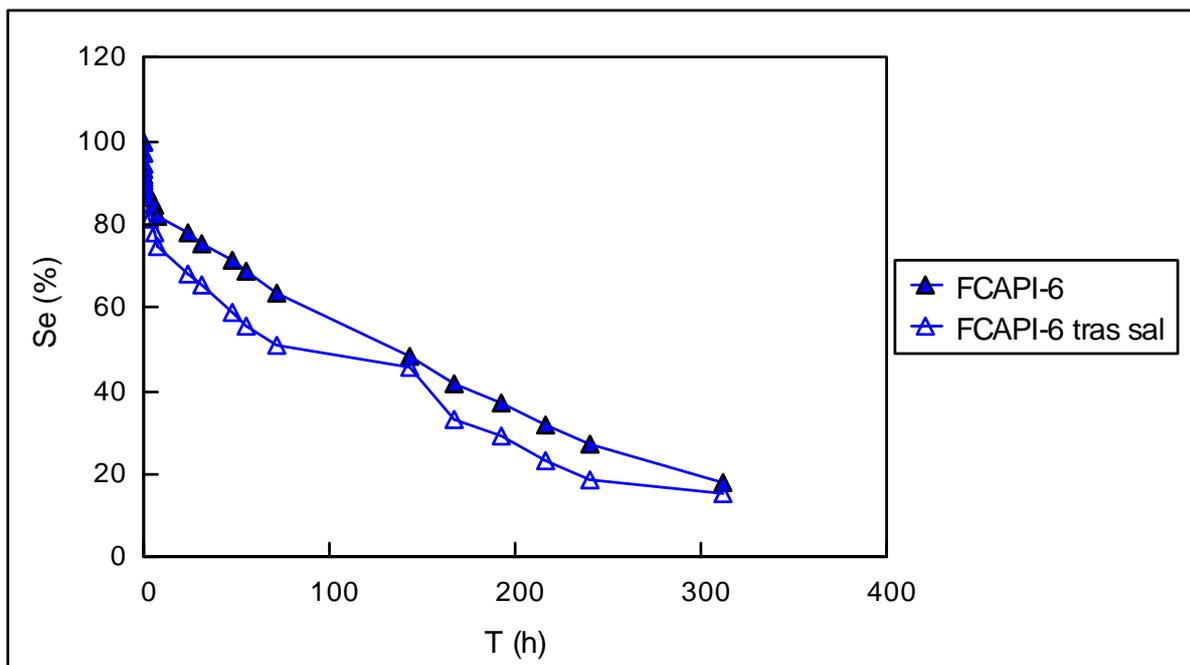
Figura 83. Succión capilar de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 6 caras, antes y después de sales.



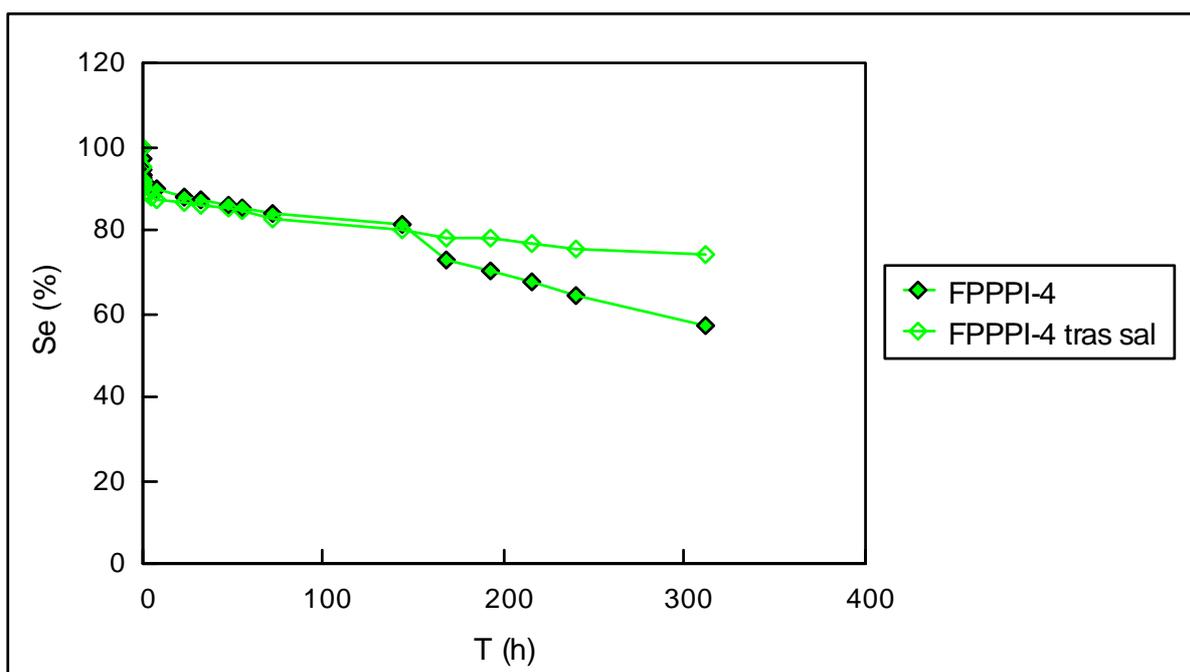
**Figura 84.** Desorción de la Arenisca del Figaró sin tratar, antes y después de sales.



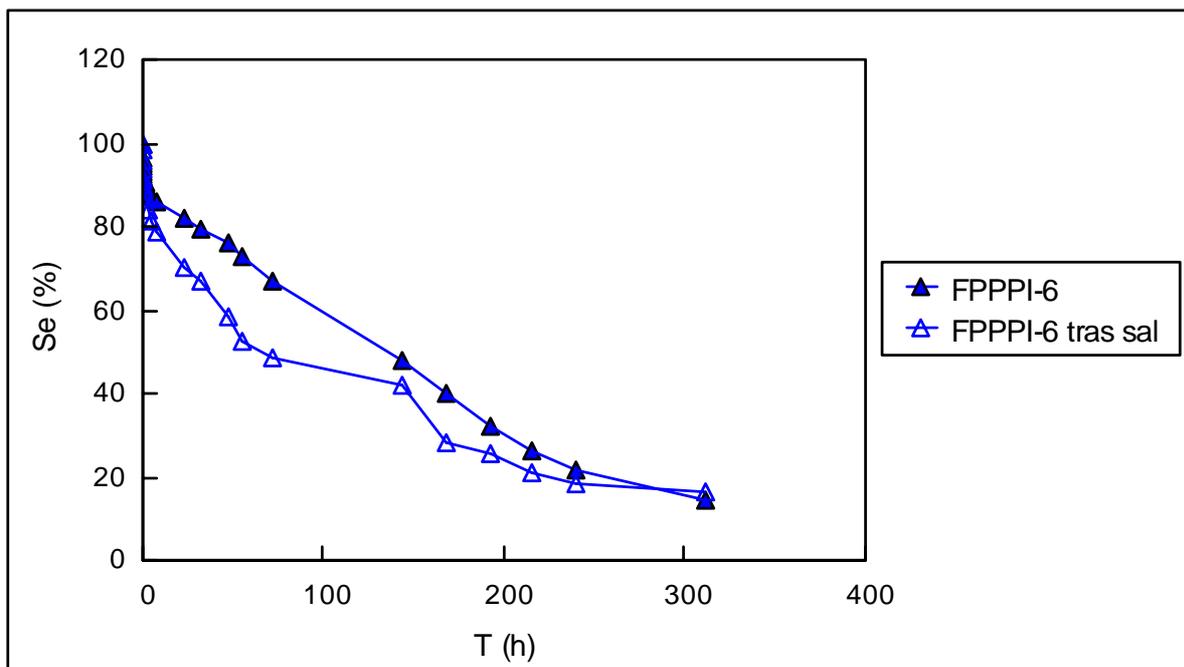
**Figura 85.** Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 4 caras, antes y después de sales.



**Figura 86.** Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con CAPI por 6 caras, antes y después de sales.



**Figura 87.** Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 4 caras, antes y después de sales.



**Figura 88.** Desorción de la Arenisca del Figaró tratada con PPPI por 6 caras, antes y después de sales.

## 7.2 Calcilutita del Lorito

### 7.2.1 Propiedades petrofísicas

En la Tabla 24 se presenta el coeficiente de absorción capilar obtenido para este tipo de roca, tratada y sin tratar con los productos conservativos, aplicados por 6 caras y por 4 caras, antes y después de someter las probetas al ensayo de envejecimiento artificial acelerado.

No se ha podido realizar otros ensayos ya que las probetas sin tratar y envejecidas se desmoronaron tras este primer ensayo.

	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))
L	11,73
L tras sal	4,62
LCAPI-6	0,23
LCAPI-6 tras sal	0,18
LCAPI-4	2,00
LCAPI-4 tras sal	3,37
LPPPI-6	0,18
LPPPI-6 tras sal	0,17
LPPPI-4	1,83
LPPPI-4 tras sal	3,68

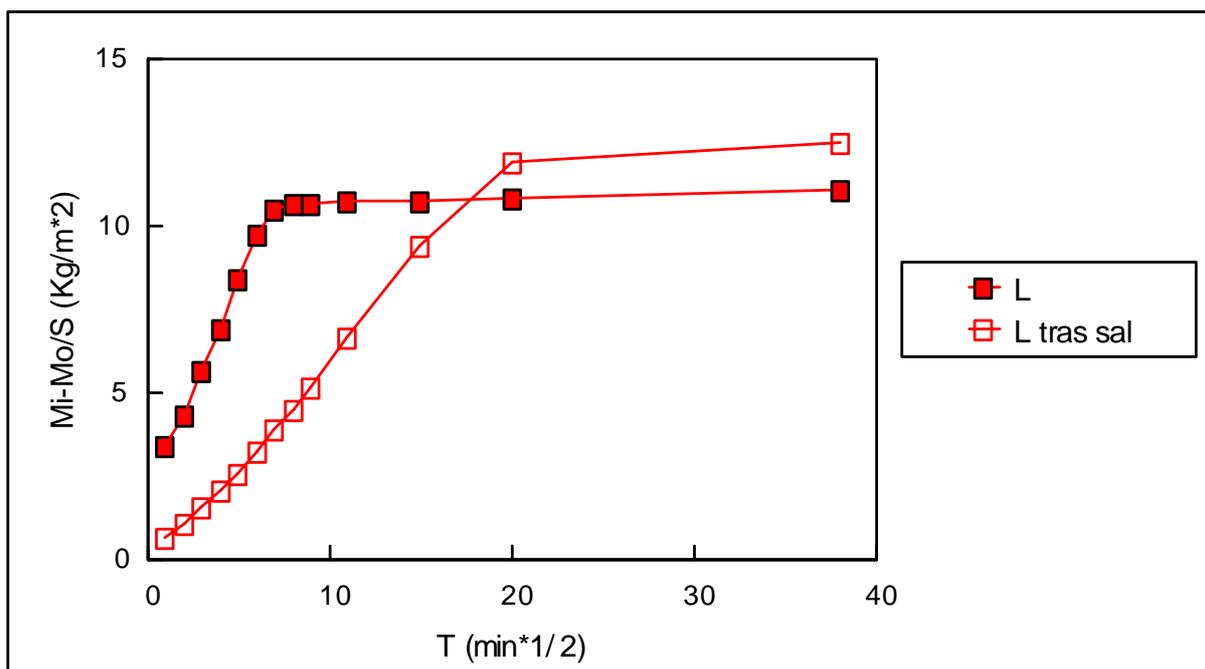
**Tabla 24.** Coeficiente de absorción capilar (c.A.C.) de la calcilutita del Lorito (L) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI) por 6 y 4 caras.

### 7.2.2 Comentario

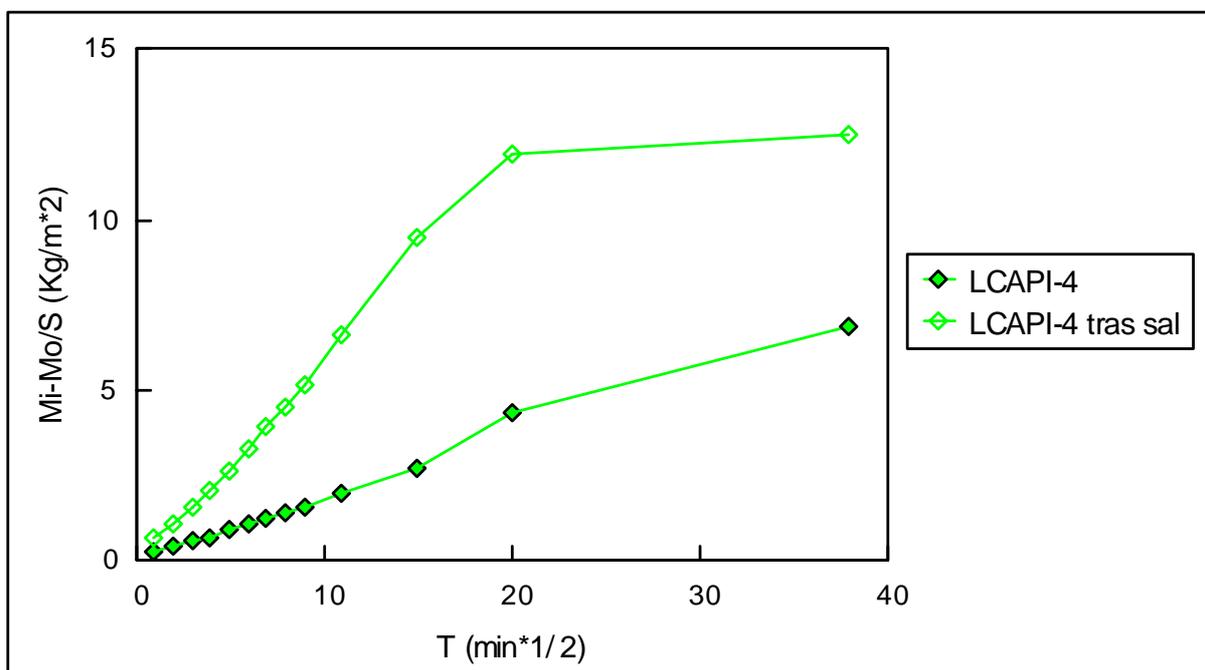
Las probetas tratadas por 4 caras, y una vez envejecidas, experimentan un aumento considerable de su coeficiente de absorción capilar, del orden del 68% en el caso del CAPI y del 100% en el caso del PPPI (ver figuras 90 y 92). El hecho que el tratamiento haga una barrera perpendicular a la superficie ensayada permite que el agua ascienda más rápidamente por capilaridad en esta zona.

Las probetas sin tratar experimentan una reducción del 39% en su velocidad de succión de agua, aunque al finalizar el ensayo la cantidad de masa de agua absorbida es mayor (ver figura 89). Esta reducción en la velocidad puede estar acompañada de una mayor tortuosidad de la red porosa tras el envejecimiento, ya que el sulfato desestabiliza los cristales de dolomita parcialmente dedolomitizada (J.L. Prada, 1995).

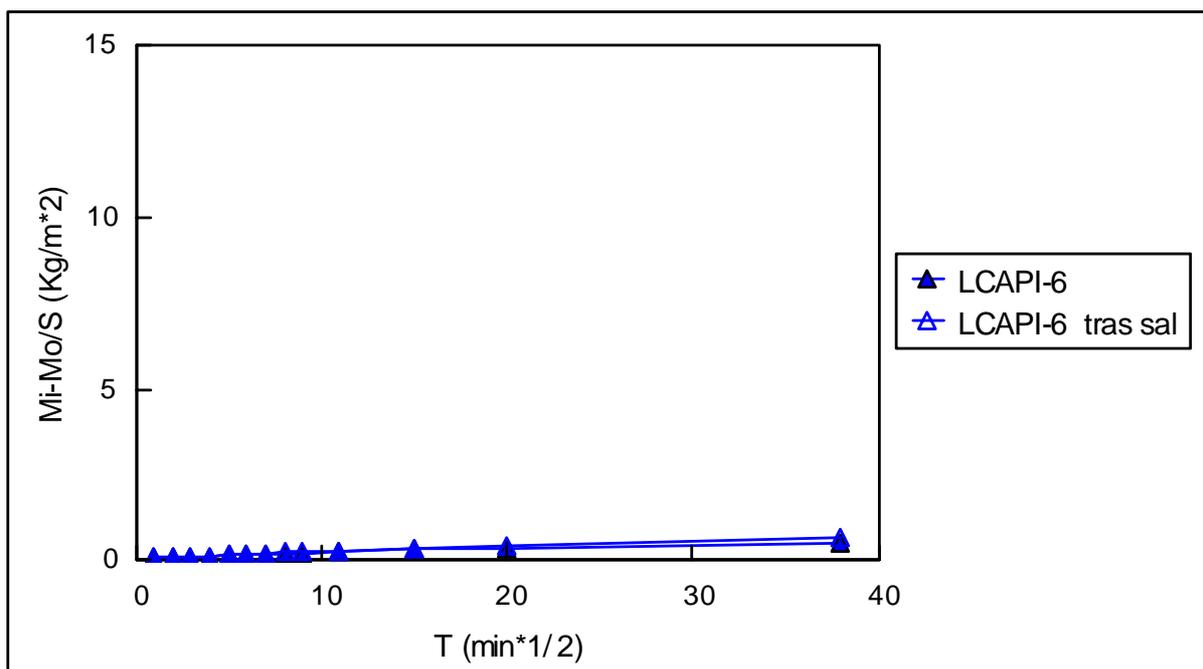
Por último, el comportamiento de las probetas tratadas por las seis caras es muy similar, lo que vuelve a corroborar que este tipo de tratamiento impide que el agua y las sales entren en la red porosa de la roca (ver figuras 91 y 93).



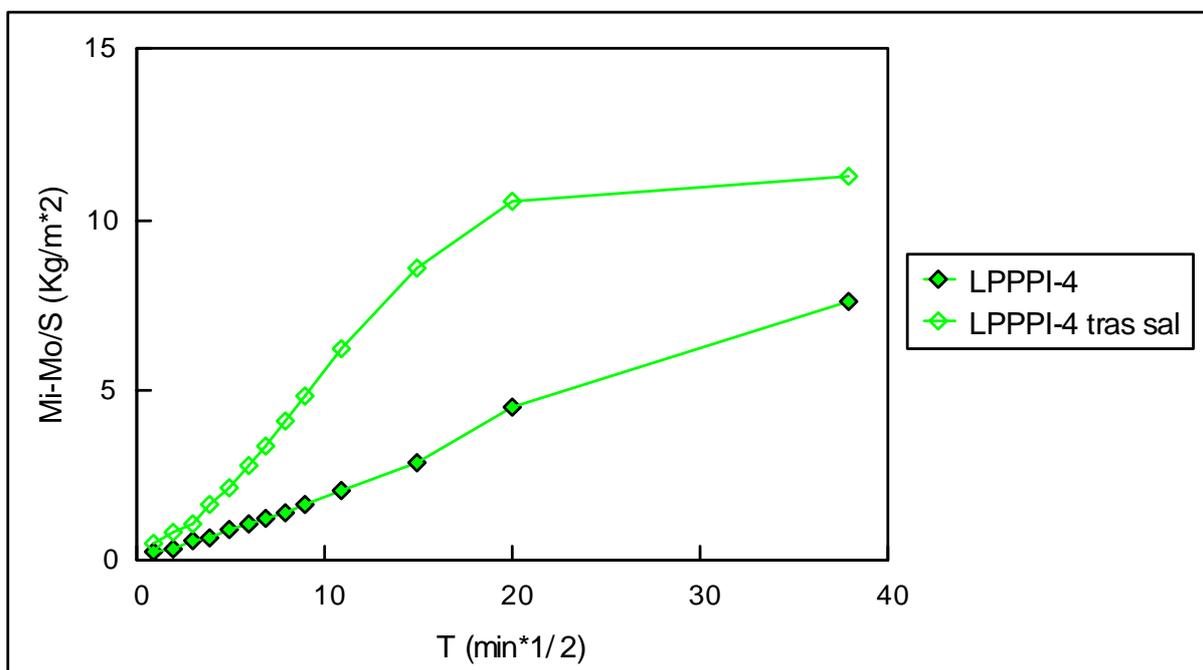
**Figura 89.** Succión capilar de la Calcilitita del Lorito sin tratar, antes y después de sales.



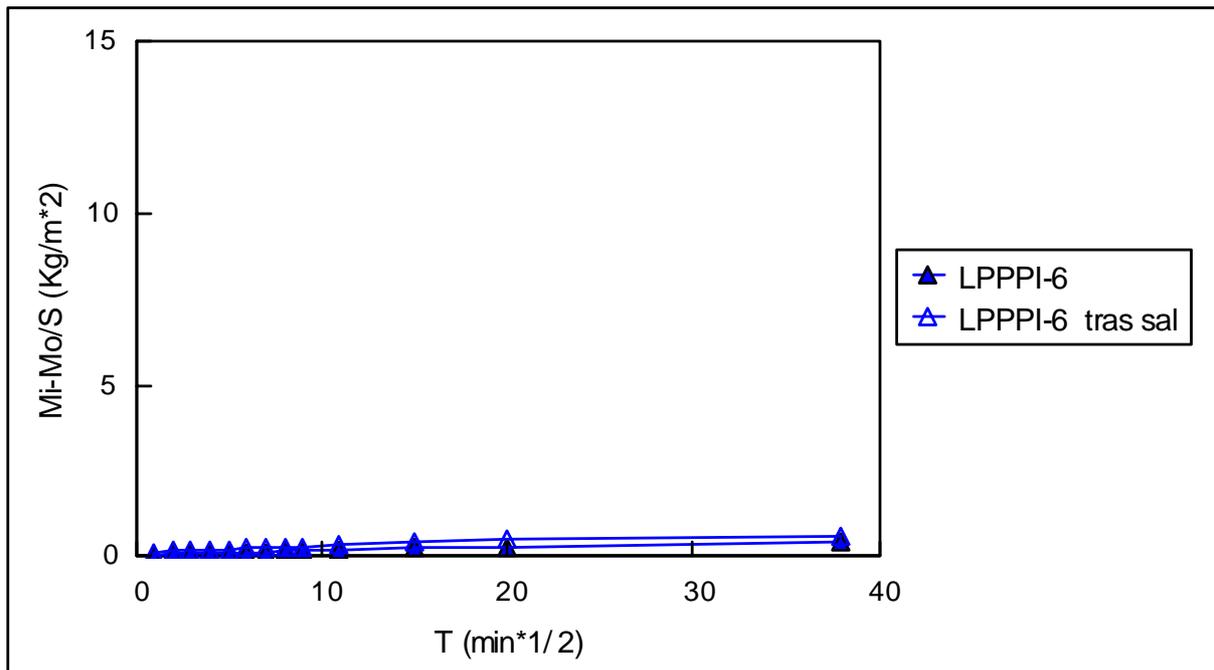
**Figura 90.** Succión capilar de la Calcilitita del Lorito tratada con CAPI por 4 caras, antes y después de sales.



**Figura 91.** Succión capilar de la Calcilita del Lorito tratada con CAPI por 6 caras, antes y después de sales.



**Figura 92.** Succión capilar de la Calcilita del Lorito tratada con PPPI por 4 caras, antes y después de sales.



**Figura 93.** Succión capilar de la Calcilita del Lorito tratada con PPPI por 6 caras, antes y después de sales.

## 7.3 Caliza de Hontoria

### 7.3.1 Propiedades petrofísicas

En la Tabla 25 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca, sin tratar y tratada con los productos conservativos, aplicados por 4 caras, antes y después de ser sometida al ensayo de envejecimiento artificial acelerado.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)
<b>A</b>	22,24	10,54	4,68	32,65
<b>A tras sal</b>	23,53	11,37	4,71	50,61
<b>ACAPI</b>	23,21	11,18	1,99	42,36
<b>ACAPI tras sal</b>	22,75	11,00	1,66	59,77
<b>APPPI</b>	22,61	10,88	1,80	41,75
<b>APPPI tras sal</b>	20,37	9,59	1,09	50,12

**Tabla 25.** Propiedades petrofísicas de la caliza de Hontoria (A) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI) por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción.

La porosidad de las probetas sin tratar, tras el ensayo de envejecimiento artificial, ha aumentado un 5,8%. Por el contrario, la porosidad de las probetas tratadas envejecidas se ha reducido, un 2% en el caso del CAPI y un 10% en el del PPPI.

La cantidad de agua absorbida por las probetas presenta la misma variación que en el caso de la porosidad.

El coeficiente de absorción capilar de las probetas sin tratar y envejecidas es ligeramente superior, del orden del 0,6%, al de las probetas sin envejecer. El resto de las probetas envejecidas tienen un coeficiente de absorción capilar inferior al de las probetas sin envejecer; en el primer caso la reducción es de un 16%, mientras que en el segundo caso la reducción es de un 40%.

Pero como se puede ver en la figura 94, el incremento de masa por unidad de superficie al finalizar el ensayo, en el caso de las probetas sin tratar y sin envejecer, es ligeramente superior al de las probetas envejecidas. En el caso de las probetas tratadas con CAPI, la evolución es similar, aunque la diferencia de incremento de masa por unidad de superficie es mayor entre las probetas envejecidas y las no envejecidas.

Las probetas tratadas con PPPI experimentan una evolución a la inversa que las anteriores: si bien el coeficiente de succión es ligeramente superior en las probetas no envejecidas, al finalizar el ensayo las probetas envejecidas han succionado más agua que las no envejecidas.

En todos los casos, las probetas envejecidas artificialmente, tanto sin tratar como tratadas, han retenido más cantidad de agua que antes de ser envejecidas (ver figura 95).

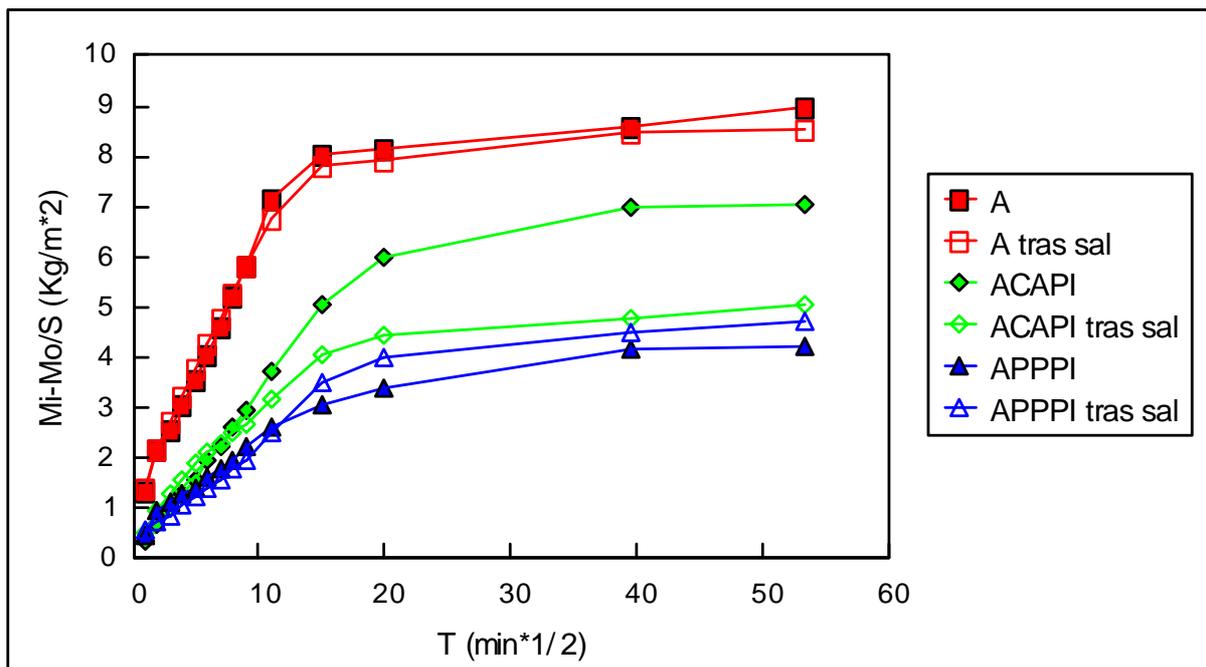
### **7.3.2 Comentario**

La variación de las propiedades en las probetas envejecidas se puede relacionar con una acumulación de sales en la red porosa de la roca más que con una modificación de la misma, ya que esta roca tiene una porosidad de diámetro de poro suficientemente grande como para que los esfuerzos mecánicos que se producen durante la cristalización de sales no modifiquen excesivamente su trazado y forma.

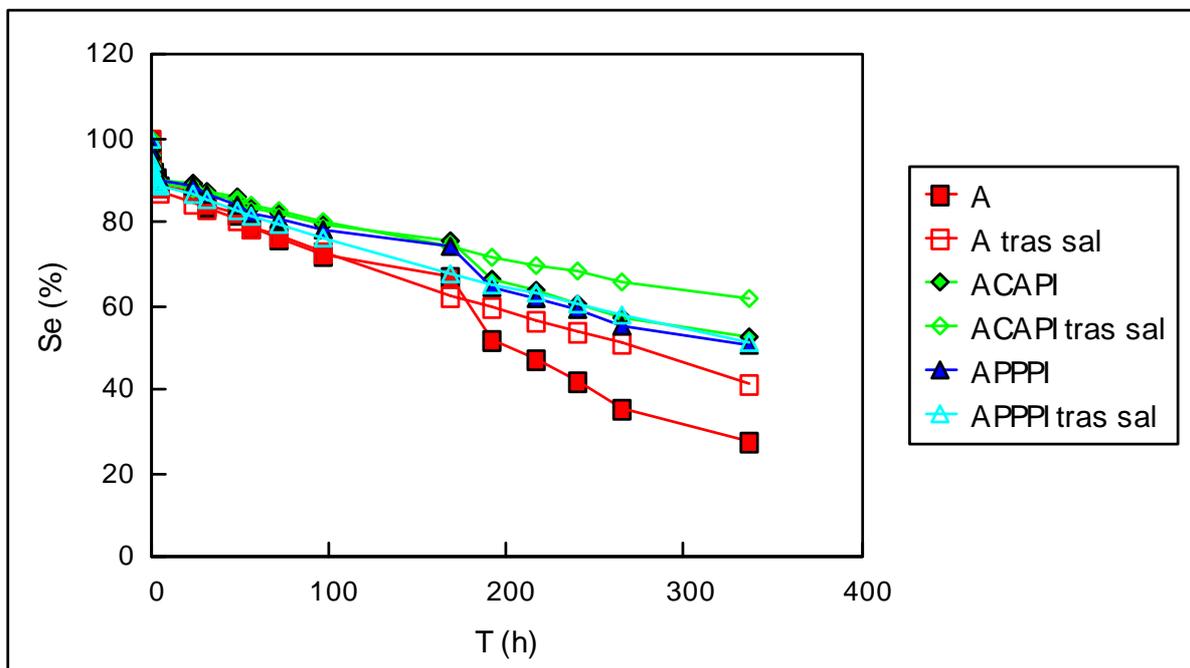
Las sales acumuladas dentro de la red porosa pueden absorber agua, ralentizando su evaporación.

De esta forma se puede entender cómo las probetas sin tratar, aún habiendo aumentado ligeramente su porosidad tras el envejecimiento, retienen más cantidad de agua que las probetas sin envejecer.

En cualquier caso, las probetas tratadas con Plurifach P y Parrogum Invisible son las que han experimentado una reducción más elevada de los valores de las propiedades estudiadas.



**Figura 94.** Succión capilar de la Caliza de Hontoria sin tratar y tratada, antes y después de sales.



**Figura 95.** Desorción de la Caliza de Hontoria sin tratar y tratada, antes y después de sales.

## 7.4 Arenisca de Durango

### 7.4.1 Propiedades petrofísicas

En la Tabla 26 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca, sin tratar y tratada con los productos conservativos, aplicados por 4 caras, antes y después de ser sometida al ensayo de envejecimiento artificial acelerado.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m h <sup>2 1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)
<b>B</b>	10,29	4,24	1,35	52,09
<b>B tras sal</b>	10,70	4,43	0,88	52,18
<b>BCAPI</b>	9,87	4,07	0,30	42,54
<b>BCAPI tras sal</b>	9,76	4,00	0,39	62,52
<b>BPPPI</b>	9,63	3,95	0,26	40,87
<b>BPPPI tras sal</b>	10,00	4,12	0,41	70,48

**Tabla 26.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Durango (B) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI) por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción.

La porosidad de las probetas sin tratar y las tratadas con Plurifach P tras el ensayo de envejecimiento artificial ha aumentado ligeramente, del orden del 4%.

La cantidad de agua absorbida por las probetas presenta la misma variación que en el caso de la porosidad.

El coeficiente de absorción capilar de las probetas tratadas y envejecidas es superior al de las mismas sin envejecer. Las probetas sin tratar y envejecidas tienen un coeficiente de absorción capilar inferior al de las mismas sin envejecer (ver figura 96).

Las probetas envejecidas artificialmente han retenido más cantidad de agua que antes de ser envejecidas tras el ensayo de desorción (ver figura 97).

### 7.4.2 Comentario

El envejecimiento de las probetas tratadas puede ser el responsable de haber puesto de manifiesto, de forma más o menos clara, la interfase entre zona tratada y sin tratar, permitiendo una mayor succión capilar en esta zona, y una ralentización en la desorción de agua a través de la zona tratada: Las probetas tratadas con CAPI y envejecidas casi no han visto modificada su porosidad, pero sí han succionado más rápidamente y han desorbido más lentamente que las probetas sin envejecer.

Las probetas tratadas con PPPI y envejecidas sí han aumentado su porosidad. Posiblemente el propio carácter del tratamiento, que forma una película bastante continua, haya generado una

separación más clara entre la zona tratada y la no tratada tras el envejecimiento, permitiendo la entrada de agua más fácilmente.

El hecho que las probetas envejecidas retengan más cantidad de agua al finalizar el ensayo de deserción puede estar relacionado con una acumulación de sales en la red porosa de la roca, que posteriormente ralentiza la pérdida de agua.

Las probetas tratadas con Consistone A y Parrogum Invisible han experimentado una menor variación de sus propiedades tras ser envejecidas artificialmente, comparándolas con las tratadas con el otro grupo de productos, e incluso con las probetas sin tratar.

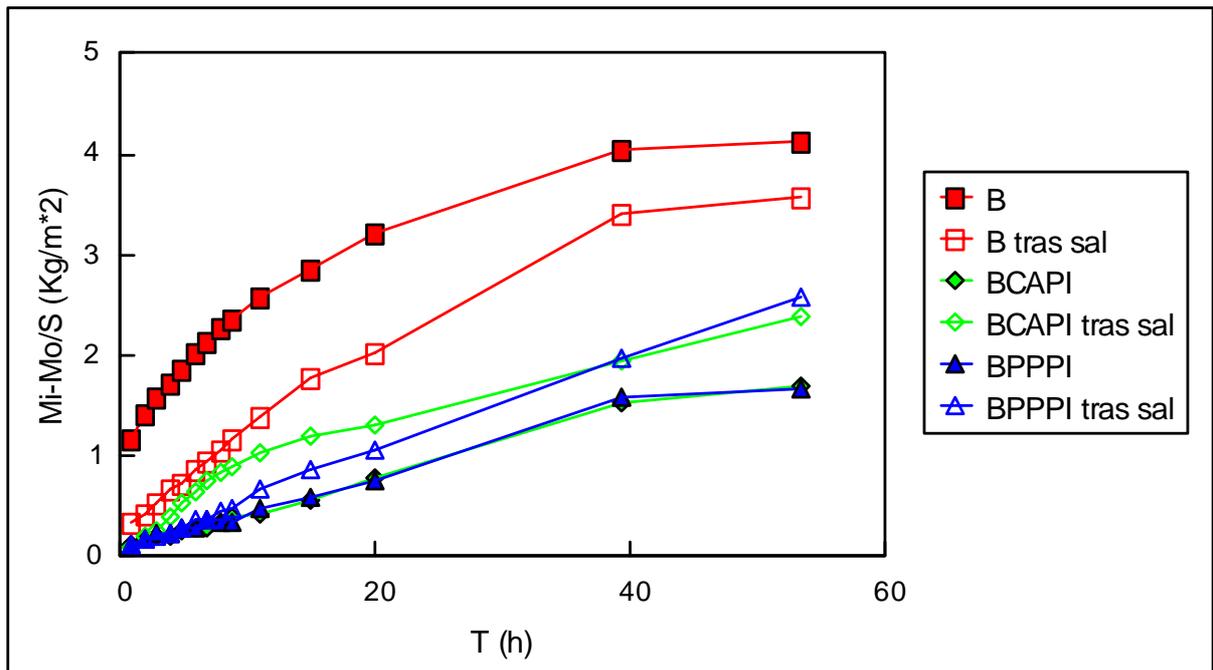


Figura 96. Succión capilar de la Arenisca de Durango sin tratar y tratada, antes y después de sales.

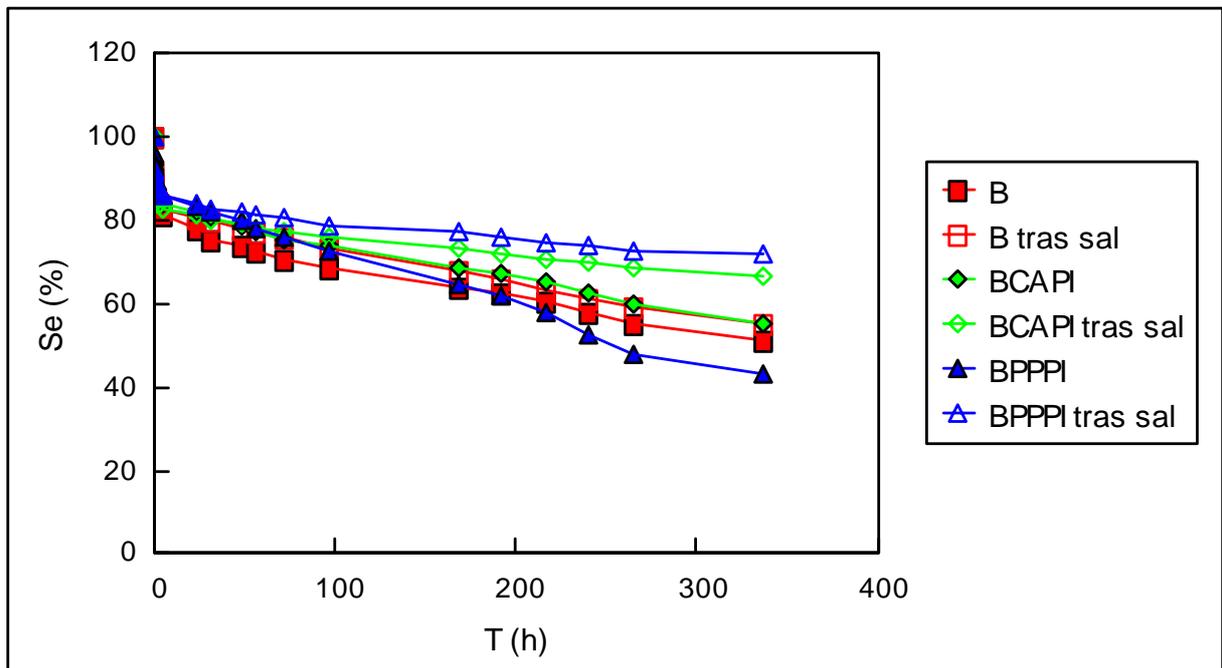


Figura 97. Desorción de la Arenisca de Durango sin tratar y tratada, antes y después de sales.

## 7.5 Arenisca de Begoña

### 7.5.1 Propiedades petrofísicas

En la Tabla 27 se presentan los parámetros de caracterización petrofísica obtenidos para este tipo de roca, sin tratar y tratada con los productos conservativos, aplicados por 4 caras, antes y después de ser sometida al ensayo de envejecimiento artificial acelerado.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. (Kg/(m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ))	$S_D$ FINAL (%)
C	14,84	6,51	1,19	38,24
C tras sal	14,39	6,27	1,15	35,99
CCAPI	15,52	6,88	0,94	22,29
CCAPI tras sal	15,32	6,78	0,77	44,47
CPPPI	14,17	6,20	0,78	23,65
CPPPI tras sal	14,32	6,27	1,19	32,88

**Tabla 27.** Propiedades petrofísicas de la arenisca de Begoña (C) tratada con Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y con Plurifach P y Parrogum Invisible (PPPI) por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción.

La variación de porosidad observada tras el envejecimiento artificial, es mínima: mientras que la porosidad de las probetas sin tratar y envejecidas ha disminuido un 3%, la porosidad de las probetas tratadas con CAPI ha disminuido sólo un 1%; sin embargo, cabe remarcar que la porosidad de las probetas tratadas con Plurifach P y envejecidas ha aumentado un 1%, debida a la formación de grietas paralelas a la estratificación. La cantidad de agua absorbida por las probetas presenta la misma variación que en el caso de la porosidad.

El coeficiente de absorción capilar de las probetas envejecidas es inferior al de las probetas sin envejecer tanto en el caso de las probetas sin tratar, donde este valor se ha reducido un 3%, como en el de las probetas tratadas con CAPI, el cual se ha reducido un 18%. Las probetas envejecidas y tratadas con PPPI succionan agua por capilaridad más rápidamente que antes de ser envejecidas, posiblemente por la variación en la red porosa que han sufrido durante el envejecimiento (ver figura 98).

Las probetas sin tratar y envejecidas han retenido un 6% menos de cantidad de agua que antes de ser envejecidas; las probetas tratadas y envejecidas retienen más cantidad de agua: las probetas tratadas con CAPI casi el 100%, y las tratadas con PPPI un 40% más (ver figura 99).

### 7.5.2 Comentario

Si bien la variación de los valores de la mayoría de las propiedades de las probetas, tanto tratadas como sin tratar, no ha sido muy importante, la cantidad de agua retenida por las probetas tratadas y envejecidas, al finalizar el ensayo de desorción, ha sido muy superior al de las probetas sin envejecer; posiblemente este hecho sea debido al remanente de sales

solubles dentro de su red porosa, las cuales retienen el agua. Esta hipótesis viene corroborada porque no se ha producido una variación de porosidad ni una variación en la absorción capilar considerables como para suponer que se haya modificado considerablemente la red porosa de estas probetas tratadas tras su envejecimiento, a excepción de las tratadas con PPPI.

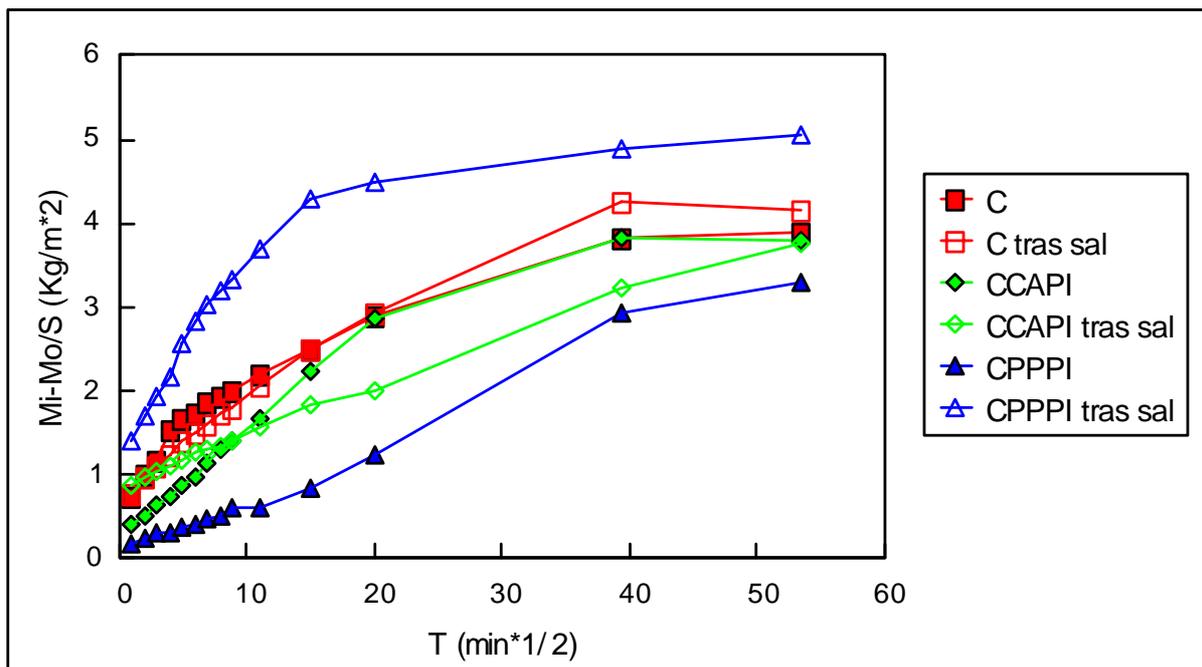


Figura 98. Succión capilar de la Arenisca de Begoña sin tratar y tratada, antes y después de sales.

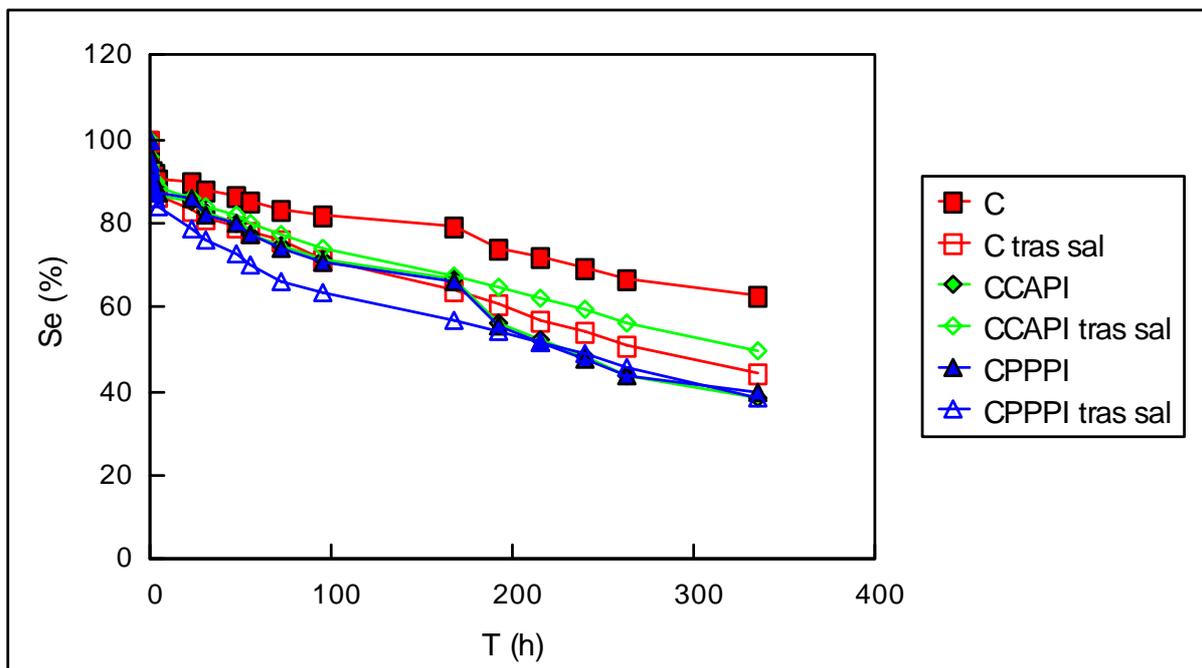


Figura 99. Desorción de la Arenisca de Begoña sin tratar y tratada, antes y después de sales.

## 7.6 Arenisca de Montjuïc

### 7.6.1 Propiedades petrofísicas

En la Tabla 28 se presentan los parámetros obtenidos de caracterización petrofísica para este tipo de roca, sin tratar y tratada con los productos conservativos, aplicados por 4 caras, antes y después de ser sometida a los ensayos de envejecimiento artificial acelerado de cristalización de sales y de hielo - deshielo.

	$n_0$ (%)	$W_s$ (%)	c.A.C. ( $\text{Kg}/(\text{m}^2 \text{h}^{1/2})$ )	$S_D$ FINAL (%)
<b>Mo</b>	17,79	8,34	4,28	3,51
<b>Mo tras sal</b>	17,60	8,34	2,76	3,63
<b>Mo tras heladas</b>	17,70	8,35	4,21	2,82
<b>MoCFPI</b>	17,86	8,39	3,23	2,38
<b>MoCFPI tras sal</b>	17,47	8,20	2,38	3,31
<b>MoCFPI tras heladas</b>	17,49	8,20	3,51	5,59
<b>MoCAPI</b>	17,35	8,11	2,82	2,82
<b>MoCAPI tras sal</b>	16,99	7,93	2,04	3,39
<b>MoCAPI tras heladas</b>	16,99	7,93	3,50	4,36
<b>MoTVTC</b>	17,57	8,25	2,61	2,63
<b>MoTVTC tras sal</b>	17,37	8,12	2,35	4,64
<b>MoTVTC tras heladas</b>	17,42	8,24	3,60	4,92

**Tabla 28.** Propiedades petrofísicas de Montjuïc (Mo) tratada con Consistone FS y Parrogum Invisible (CFPI), Consistone A y Parrogum Invisible (CAPI) y Tegovakon V y Tegosivin HL100 (TVTC), por 4 caras.

$n_0$ : porosidad abierta accesible al agua;  $W_s$ : contenido máximo de agua absorbida; c.A.C.: coeficiente de absorción capilar;  $S_D$  FINAL: grado de saturación final, tras la desorción.

La porosidad y la cantidad de agua absorbida por las probetas sin tratar y tratadas, tras el envejecimiento, no han variado mucho, siendo esta reducción inferior al 2%. La cristalización de sales es el agente de alteración que más modificaciones ha producido.

El coeficiente de absorción capilar de las probetas sin tratar envejecidas es inferior al de las mismas sin envejecer. Cabe remarcar que las probetas procedentes de la cristalización de sales presentan una reducción del valor de este coeficiente de un 35%, mientras que en las procedentes del ensayo de hielo – deshielo esta reducción sólo es del 1,6%.

Las probetas procedentes del ensayo de cristalización de sales presentan un valor del coeficiente de absorción capilar menor que las probetas sin envejecer; las procedentes del ensayo de hielo – deshielo presentan un valor del coeficiente mayor que antes de ser envejecidas (ver figuras 100 y 101).

Todas las probetas, al ser envejecidas, retienen más agua al finalizar el ensayo de desorción, a excepción de las probetas sin tratar tras el ensayo de hielo – deshielo (ver figuras 102 y 103).

### **7.6.2 Comentario**

Las probetas envejecidas han experimentado, en general, una ligera reducción de la porosidad y una modificación del resto de propiedades acorde con esta disminución de porosidad.

Cabe remarcar que las probetas tratadas, una vez envejecidas mediante el ensayo de hielo – deshielo, han aumentado su coeficiente de absorción capilar. Este hecho se puede explicar posiblemente porque las fuerzas de cristalización del agua, al helarse, tienden a modificar ligeramente la red porosa de la roca, haciéndola más bien comunicada.

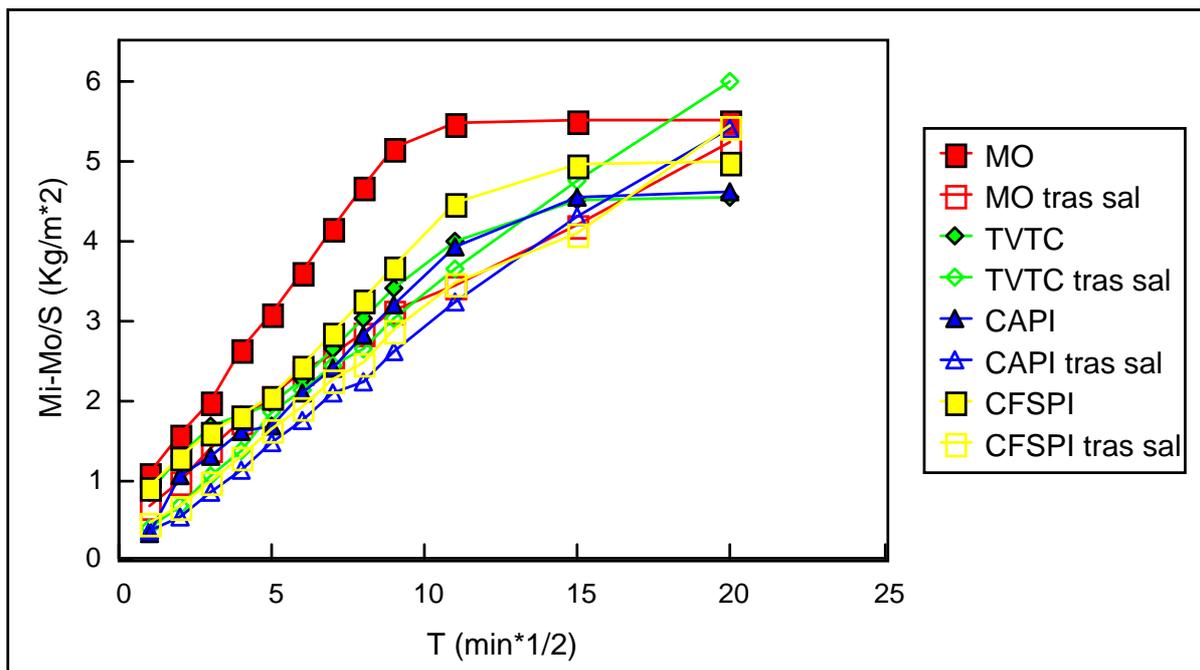


Figura 100. Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de sales.

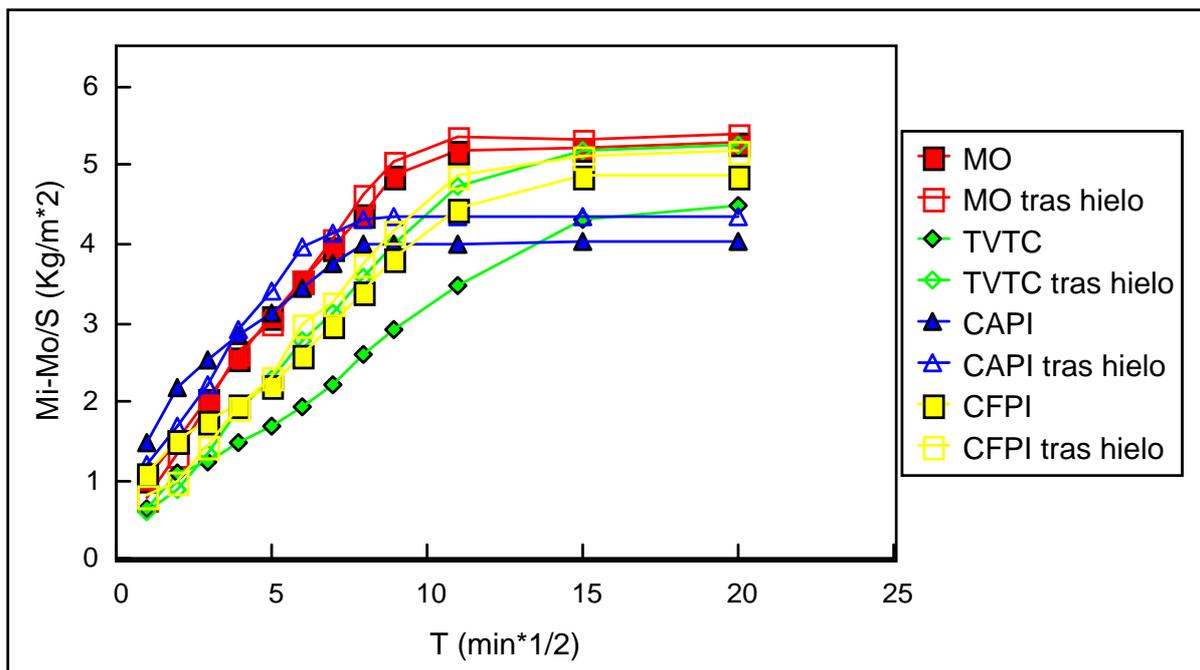
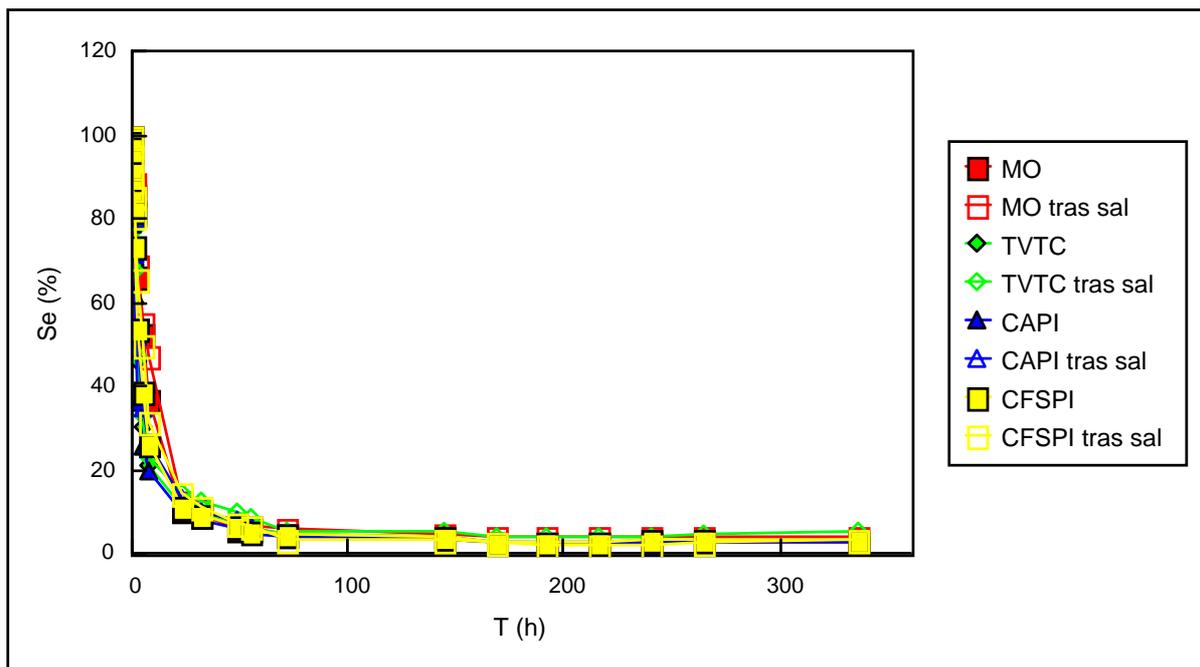
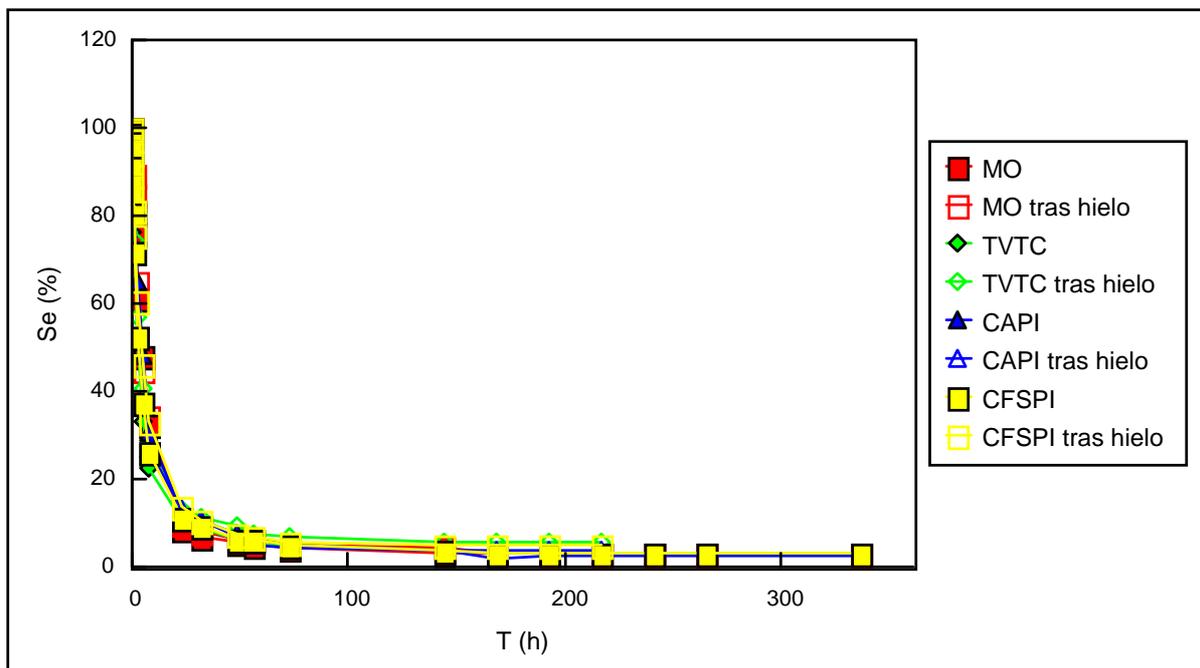


Figura 101. Succión capilar de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de hielo – deshielo.



**Figura 102.** Desorción de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de sales.



**Figura 103.** Desorción de la Arenisca de Montjuïc sin tratar y tratada, antes y después de hielo – deshielo.

## 8 CONCLUSIONES

En este trabajo se han caracterizado petrológica y petrofísicamente seis tipos de roca natural (Arenisca del Figaró, Calcilutita del Lorito, Caliza de Hontoria, Arenisca de Durango, Arenisca de Begoña y Arenisca de Montjuïc) y un mortero artificial (Parrot's Mix nº4). También se ha estudiado el comportamiento de estos materiales frente al envejecimiento artificial acelerado mediante cristalización de sales. En el caso de la Arenisca de Montjuïc, también se ha realizado el envejecimiento artificial acelerado mediante el ensayo de hielo – deshielo.

Posteriormente se han tratado los 7 materiales estudiados con productos de carácter consolidante e hidrofugante de la marca Parrot (AKZO NOBEL). La Arenisca de Montjuïc también se ha tratado con los productos antes mencionados y con dos de las mismas características, pero de la empresa Th. Goldsmicht.

Posteriormente se ha vuelto a realizar la caracterización petrofísica y los ensayos de envejecimiento artificial acelerado citados; de esta manera se ha podido determinar las modificaciones que experimentan las propiedades de los materiales estudiados una vez tratados, y determinar así la bondad de los productos conservativos ensayados.

Por último, se ha vuelto a caracterizar petrofísicamente las rocas naturales sin tratar y tratadas y envejecidas artificialmente. Así se ha podido observar la influencia del envejecimiento en cada tipo de material y ver cómo responde cada tratamiento ensayado.

Las conclusiones, para cada tipo de material, son las siguientes:

### ARENISCA DEL FIGARÓ:

Teniendo en cuenta la composición mineralógica de esta roca, sus buenas propiedades petrofísicas y que no se altera excesivamente en el ensayo de envejecimiento artificial acelerado por cristalización de sales, esta roca se puede considerar buena para la construcción. De hecho, así lo demuestran las construcciones realizadas con este tipo de roca: Termas Romanas de Caldes de Montbui, Pont del Diable, zona romana en Martorell, Iglesia de Cervelló, etc.

De los tratamientos ensayados, el que menos modifica las propiedades petrofísicas de este tipo de roca es el **Consistone A y Parrogum Invisible**, incluso una vez envejecida.

### CALCILUTITA DEL LORITO

Es una roca muy susceptible de ser alterada, tanto por su composición mineralógica como por sus propiedades petrofísicas. Resiste muy mal el ataque de las sales solubles (la Muralla Romana de Tarragona, sector Sant Antoni, era un buen ejemplo; ahora está revestida con otro tipo de roca).

La aplicación de tratamientos conservativos mejora mucho el comportamiento de esta roca. De los tratamientos estudiados, el que mejores resultados ha dado es el **Consistone A y Parrogum Invisible**.

## CALIZA DE HONTORIA

Esta roca no presenta excesivos problemas frente a la acción del agua en su fase líquida ni frente a la acción agresiva de las sales solubles.

Los tratamientos conservativos ensayados mejoran ligeramente las propiedades petrofísicas de esta roca, siendo el tratamiento con **Plurifach P y Parrogum Invisible** el que mejores resultados ha dado.

## ARENISCA DE DURANGO

Esta roca tiene puntos de debilidad frente al ataque de sales solubles: son los niveles más finos de los planos de estratificación. Aun siendo una roca bastante buena para la construcción, si se coloca con la estratificación perpendicular al suelo, la alteración de los niveles finos puede producirse rápidamente.

De los tratamientos estudiados, el que menos modifica las propiedades de esta roca es el **Consistone A y Parrogum Invisible**.

## ARENISCA DE BEGOÑA

Esta roca tiene unas propiedades petrofísicas no muy buenas y se altera bajo la acción de las sales solubles, sobre todo en los niveles más finos de los planos de estratificación.

Si bien los tratamientos conservativos ensayados mejoran las propiedades de esta roca, la generación de grietas y fisuras de la zona tratada tras el ensayo de envejecimiento artificial acelerado hace desaconsejable su tratamiento.

## ARENISCA DE MONTJUÏC

De todas las rocas estudiadas, es la roca que permite una mejor movilidad del agua a través de su red porosa, absorbiendo agua con facilidad, y también desorbiéndola de la misma forma, y no se ve afectada por la acción disruptiva de la cristalización de sales en su interior. Cabe remarcar la aparición de una coloración rojiza al finalizar aquellos ensayos en los que la roca permanece en contacto con el agua durante periodos largos.

Los tratamientos conservativos ensayados generan variaciones leves a las propiedades de esta roca, sin impedir la coloración rojiza de la misma tras largos periodos en contacto con el agua.

De los tratamientos estudiados, el que menos modifica las propiedades de esta roca es el **Consistone FS y Parrogum Invisible**.

## PARROT'S MIX N°4

Es un material de una porosidad abierta muy elevada y con una gran capacidad de absorción de agua en condiciones de vacío. La movilidad del agua dentro de la red porosa de este material es muy lenta.

Se altera muy poco por la acción de las sales solubles, y menos aún cuando está tratado con **Consistone A y Parrogum Invisible**, que es el tratamiento recomendado para este tipo de material.

El envejecimiento artificial acelerado comporta una variación de las propiedades petrofísicas de las rocas estudiadas, que no siempre comportan un empeoramiento de estas mismas.

Respecto al tratamiento por 4 caras o por 6, cabe señalar:

- La reducción de porosidad y, por consiguiente, el contenido de agua en saturación, son más acusados en las probetas tratadas por 6 caras que en las tratadas por 4 caras.
- Las probetas tratadas por 6 caras succionan agua demasiado lentamente respecto a las probetas sin tratar. Las probetas tratadas por 4 caras tienen una dinámica de succión más similar a la observada en las probetas sin tratar.
- La velocidad de desorción es más lenta en las rocas tratadas por 6 caras que en aquellas tratadas por 4 caras.
- Las probetas tratadas por 6 caras absorben, bajo condiciones ambientales, poca agua.
- En cristalización de sales, las probetas tratadas por 6 caras no pierden casi masa, ya que la solución salina no puede penetrar.

En las construcciones hechas en piedra, o en aplacados ya colocados, nunca se puede tratar la roca por las 6 caras; como máximo se podrá tratar 3 caras.

Así pues, el hacer ensayos experimentales, tratando la roca por las 6 caras, no aporta información que se pueda extrapolar a la realidad. En cambio, al dejar sin tratar dos caras paralelas de las probetas a ensayar, se está asimilando la probeta al edificio, y por tanto, las conclusiones así obtenidas son directamente relacionables con lo que sucederá en la roca puesta en obra.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

ALCALDE, M.; VILLEGAS, R.; VALE, J.F.; MARTÍN A. (1990). *Diagnosis y tratamiento de la piedra*. Monografía nº 400, Instituto C.C.E. Torroja, pp. 81.

ALESSANDRINI, G.; PERUZZI, R.; ROSSI-DORIA, P.; LAURENZI-TABASSO, M. (1978). *Control of the behaviour of the two epoxy resins for stone treatments*. Proc. Int. Symp. Deterioration and Protection of Stone Monuments, París, 6.1.

ALONSO, F.J. (1986). *Caracterización petrofísica y Alterabilidad de Calizas y Dolomías*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 309 pp.

ALONSO, F.J.; ESBERT, R.M.; et al. (1987). *Ensayos de alterabilidad: Revisión crítica del ensayo de cristalización de sales*. Seminario de calidad en la edificación. Oviedo. 17 pp.

ÀLVAREZ, A., ARGEMÍ, M., NAVARRO, A., PRADA, J.L. (1992). *Informe dels l'assaigs de tractament de rehabilitació de la Muralla de Tarragona*. Informe técnico. Unidad de Cristalografía y Mineralogía, Departamento de Geología, Universidad Autónoma de Barcelona.

AMOROSO, G.G. (1977). *Consolidation et protection des pierres au moyen de produits minéraux et de résines synthétiques*. Matériaux et Construction, Marzo - Abril, 91-97 pp.

AMOROSO, G.G.; FASSINA, V. (1983). *Stone decay and conservation. Atmosphere pollution, cleaning, consolidation and protection*. Materials Science Monograph 11, Elsevier, Amsterdam, 453 pp.

ARIÑO, X.; ORTEGA-CALVO, J.J.; GÓMEZ-BOLEA, A.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C. (1995b). *Lichen colonization of the Roman pavement at Baelo Claudie (Cádiz, Spain): Biodeterioration versus Bioprotection*. Sci. Total Environ. 167, 353-363 pp.

ARNOLD, A.; KUENG, A. (1985). *Crystallization and habits of salt efflorescences on walls I*. V Int. Cong. Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, 13-23 pp.

ASCASO, C.; GALVAN, J.; RODRÍGUEZ PASCUAL, C. (1976). *The pedogenetic action of Parmolia conspersa, Rhizocarpon geographicum and Umbilicaria pustulata*. Lichenologist 8, 151-171 pp.

BAER, N.; HELMS, G.; LIVINGSTON, F. (1982). *The conservation / restauration of stone monuments: a progress report on the NATO - CCMS pilot study*. Proc. 4<sup>th</sup>. Int. Congr. Deterioration and Preservation of stone objects, Louisville, 39-56 pp.

BERMÚDEZ, A.; ARROYO, P.; MENCHÓN, J.; ÀLVAREZ, A.; NAVARRO EZQUERRA, A.; ARGEMÍ, M.; PRADA, J.L.; PUGÈS, M.; GOMÀ, F. (1992). *Intervencions a la Muralla de Tarragona*. III Simposi sobre restauració monumental, Diputació de Barcelona, Àrea de cooperació, Servei del Patrimoni Arquitectònic Local, Barcelona, 97-104 pp.

- BILINSKI, R.J.; PANKALA, B. (1978). *Polyvinilacetates for the protective treatment and conservation of historical objects of stone and other materials (Research work and examples of application)*. ICOM Committee for Conservation 5<sup>th</sup> Triennial Meeting, Zagreb, 10/4.
- BISCONTIN, G.; BOTTEGHI, C.; DALLO, C.; PRUSSI, G.; MORETTI, G.; VALLE, A. (1987). *Stability study of siliconic resins employed in the stone conservation*. ICOM. Committee for Conservation 8<sup>th</sup>. Triennial Meeting, Sidney.
- CABRERA, J.M. (1966). *Le portail du monastier de Sta M<sup>a</sup> de Ripoll. Étude scientifique pour sa conservation*. Colloque sur l'alteration des pierres, Bruxelles, 127-151 pp.
- CAVALETTI, R.; LAZZARINI, L.; MARCHESINI, L.; MARIETI, G. (1985). *A new type of epoxy resin for the structural consolidation of badly decayed stones*. Proc. V Int. Congr. Deterioration and Conservation of Stone, Laussane, 769-794 pp.
- CLIFTON, J.R.; GODETTE, M. (1982). *Performance tests stone consolidants*. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Cong. Deterioration and Preservation of stone objects, Louisville, 101-108 pp.
- C.N.R.-I.C.R. (1981). *Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità d'imbibizione*. Doc. Normal: 7/81, Roma, 5 pp.
- C.N.R.-I.C.R. (1985). *Assorbimento d'acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare*. Doc. Normal: 11/85, Roma, 6 pp.
- C.N.R.-I.C.R. (1985). *Permeabilità al vapor d'acqua*. Doc. Normal: 21/85, Roma, 5 pp.
- C.N.R.-I.C.R. (1986). *Indice di asciugamento*. Doc. Normal: F1 86/52, Roma, 6 pp.
- DE CASTRO, E. (1982). *Studies on stone treatments*. Proc. 4<sup>th</sup>. Int. Cong. On the Deterioration and Preservation of stone objects, Louisville, 119-125 pp.
- DE WITTE, E.; HUGET, P.; VAN DEN BROECK, P. (1977). *A comparative study of three consolidation methods on limestone*. Studies in Conservation, 22, 190-196 pp.
- DE WITTE, E.; FLORQUIN, S.; TERFVE, A. (1983). *The efficiency of water-repellents for historic buildings*. Wittman F.H. (Ed.), Materials Science and Restoration, 131-135 pp.
- DE WITTE, E.; CHAROLA, A.E.; SHERRYL, P. (1985). *Preliminary test on comercial stone consolidants*. Proc. V Int. Cong. Deterioration and Conservartion of Tone, Laussane, 709-718 pp.
- DOMASLOWSKI, W.; KOZANECKA, J.K.; RUDY, M.; SOBKOWIOK, B.; SOLDENHOFF, B. (1982). *La conservation préventive de la pierre*. Musées et Monuments XVIII, UNESCO, 158 pp.
- DOMASLOWSKI, W.; LUKASZEWICS, J.W. (1988). *Possibilities of silica application in consolidation of stone monuments*. Proc. VIth. Int. Cong. Deterioration and Conservation of Stone, Torun, 563-576 pp.
- DUNHAN, N. (1962). *Engineering geology and rock mechanics*. Vol 1. Leonard Hill, Londres, 75-114 pp.

ESBERT, R.M.; DÍAZ-PACHE, F. (1993). *Influencia de las características petrofísicas en la penetración de consolidantes en rocas monumentales porosas*. Materiales de construcción, Vol. 43, nº 230, 25-36 pp.

FOLK, R. (1962). *Spectral subdivision of limestones types*. In HAM (editor). Classification of Carbonate Rocks. Am. Ass. Petr. Geol. Mem. 1, pp. 62-84.

FRATINI, F.; MANGANELLI DEL FÀ, C.; PECCHIONI, E.; QUARTA, G.; SCALA, A. (1989). *Pietra de Lecce: studio sull'applicazione di nuovi prodotti per la sua conservazione*. Proc. Ith. Int. Symp. The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Bari, 495-499 pp.

GARCIA PASCUA, N. (1993). *La investigación de tratamientos de restauración para materiales pétreos: su actuación, comportamiento y eficacia en arenisca*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Sección de Químicas. 902 pp.

GÓMEZ GRAS, D.M. (1992). *El permotriás de las Baleares, de la Cordillera Costero Catalana y de la vertiente mediterránea de la Cordillera Ibérica: Facies y Petrología Sedimentaria*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona. 242 pp.

GÓMEZ-GRAS, D.; PARCERISA, D.; BITZER, K.; CALVET, F.; ROCA, E.; THIRY, M. (2000). *Hydrogeochemistry and diagenesis of Miocene sandstones at Montjuic, Barcelona (Spain)*. Journal of Geochemical Exploration 69: 177-182 Sp. Iss. SI, jun 2000.

GÓMEZ-GRAS, D.; PARCERISA, F.; CALVET, J.; PORTA, N.; SOLÉ DE PORTA, J. CIVÍS (2001) *Stratigraphy and petrology of the Miocene Montjuic delta (Barcelona, Spain)*. Acta Geológica Hispánica, v. 36 (2001), nº 1-2, p. 115-136.

GRISSON, C.A.; WEISS, N.R. (1981). *Alkoxysilanes in the conservation of art and architecture 1861-1981*. Art and Archaeology Technical Abstracts, vol 18, nº1, 151-197 pp.

HAMMECKER, C.; ESBERT, R.M. Y JEANNETTE, D. (1992). *Geometry modifications of porous network in carbonate rocks by ethyl silicate treatment*. 7th International congress on deterioration and conservation of stone, vol. 3, Lisboa, 1053-1081 pp.

IÑIGUEZ HERRERO, J. (1961). *Alteración de calizas y areniscas como materiales de construcción*. Publicación del Ministerio de Educación, Dirección General de Bellas Artes. Madrid, 147 pp.

KOTLIK, P.; ZELINGER, J. (1978). *Resistance of sandstone handered by polymer agents against the influence of aqueous salts solution*. Proc. Int. Symp. Deterioration and Conservation of Stone Monuments, París.

LAZZARINI, L.; LAURENZI-TABASSO, M. (1986). *Il restauro della pietra*. Ed. Cedam. Padova, 340 pp.

LEWIN, S.Z. (1988). *The deterioration and conservation*. Studies on Conservation in Cultural Heritage, UNESCO.

MARCOS, R.M. (1992). *Tratamientos de conservación aplicados a rocas carbonatadas: Catedral de León*. Tesis Doctoral. Departamento de Geología, Área de Petrología, Facultad de Ciencias de la Universidad de Oviedo. 150 pp.

MARCOS, R.M.; ESBERT, R.M.; ALONSO, F.J.; DIAZ-PACHE, F. (1993). *Características que condicionan el comportamiento de la caliza de Hontoria (Burgos) como piedra de edificación*. Boletín Geológico y Minero. Vol 104-5. 123-133 pp.

MARSCHNER, H. (1978). *Application of salt crystallisation test to impregnated stones*. Proc. Int. Symp. On Deterioration and Protection of Stone Monuments, París, 3.4.

MORA, L. (1981). *Les matériaux des enduits traditionnels*. Proc. Int. Symp. Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, Rome, 375-384 pp.

MUNSELL SOIL COLOR CHARTS (1992) Revised Edition. Macbeth Division of Kollmorgan Instruments corp. Munsell Color.

NAVARRO EZQUERRA, A. (1993). *Tratamiento de la arenisca del Buntsandstein y del mortero sintético Parrot's Mix 4 con consolidantes e hidrofugantes. Variaciones en el comportamiento petrofísico y en la alterabilidad*. Tesis de licenciatura. Departamento de Geología, Unidad de Cristalografía y mineralogía, Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona. 97 pp.

NAVARRO, A.; GARCIA, N.; ARGEMÍ, M.; ALVAREZ, A.; SÁNCHEZ, M.I.; FRIAS, M.; PARROT, J. (1995). *The influence of the method for applying treatments on the stone (4 or 6 surfaces) for the selection and the study of the effectiveness of the consolidants and water-repellents in the laboratory*. Congrès LCP 95. Conservation et restauration des biens culturels. Montreux (Suiza), 765-773 pp.

NORMA UNE 22-174-85: Granitos ornamentales. Resistencia a las heladas.

NORMA UNE 22-184-85: Mármoles y calizas ornamentales. Resistencia a las heladas.

NORMA UNE 12370: Método de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales.

NORMA UNE 12371: Método de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.

PARCERISA, D. (2002). *Petrología i diagènesi en sediments de l'Oligocè superior i del Miocè inferior i mitjà de la Depressió del Vallès i del Pla de Barcelona. Evolució de l'àrea font i dinàmica dels fluids*. Tesis doctoral inédita, UAB, 261 pp.

PARCERISA, D.; THIRY, M.; GOMEZ-GRAS, D.; CALVET, F. (2001) *Tentative model for the silicification in Neogene Montjuic sandstones, Barcelona (Spain): authigenic minerals, geochemical environment and fluid flow*. Bulletin de la société géologique de France 172 (6): 751-764.

PETTIJOHN, F.J.; POTTER, P.E., SIEVER, R. (1972): *Sand and Sandstone*. Ed. Springer. Berlin, 618 pp.

PRADA, J.L. (1995): *Caracterización de formas y procesos de alteración, observadas en la piedra de construcción de edad miocénica del área Monumental Romana de Tarragona*. Tesis Doctoral. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica, Facultat de Ciències Geològiques de la Universitat de Barcelona. 284 pp.

PRICE, C.A. (1978). *The use of the sodium sulphate crystallisation test for determining the weathering resistance of untreated stone*. Proc. Int. Simp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, París, 3.6, 23 pp.

PRICE, C.A. (1981). *The evaluation of stone preservatives*. Conf. Nat. Ac. Sc. Conservation of Historic Stone Building and Monuments, Washington.

R.I.L.E.M., (1980). *Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement*. Matériaux et Constructions, Bull, RILEM, vol. 13, n° 75, 175-253 pp.

ROSSI-DORIA, P.; TABASSO, M. (1971). *Prove di invecchiamento artificiale su pierre, marmi e laterizi*. L'Ingegnere, 6, 483-502 pp.

ROSSI-MANARESI, R. (1981). *Effectiveness of conservation treatments for the sandstone of monuments in Bologna*. Proc. II. Int. Cong. Conservation of Stone, Bologna, 665-688 pp.

SAN MIGUEL, A.; MASRIERA, A. (1970). *Contribución al estudio petrológico de los niveles de areniscas de Montjuic (Barcelona)*. Publicaciones del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación Provincial, 19, 83-104

TORRACA, G. (1981). *Porous building materials: materials science for architectural conservation*. ICCROM, Roma, 145, 132 pp.

WEBER, H. (1985). *Conservation and restoration of natural stone in Europe*. APT XVII, n° 2, 15-22 pp.

WILSON, M.J. (1995). *Interaction between lichens and rocks, a review*. Crypt. Bot. 5, 299-305 pp.

WINKLER, R. (1975). *Stone: properties, durability in man's environment*. Springer-Verlag, New York.