







**UNIVERSIDAD DE BURGOS**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS  
E INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

**TESIS DOCTORAL**

**REACTIVIDAD Y RECICLADO DE  
PIZARRAS PARA SU EMPLEO COMO  
ÁRIDOS EN CONTRUCCIÓN**

Burgos, Enero de 2016

---

Autor: Pablo Luis Campos de la Fuente  
Director: Dr. Jesús Gadea Sáinz  
Codirectora: Dra. Verónica Calderón Carpintero

---



*A Rodrigo, la Gloria  
que me reconforta cada día*

*A Ana, por su apoyo  
durante el largo camino*

*A mis padres y hermanos,  
siempre conmigo*



## Agradecimientos

---

En el impasse de tiempo que ha llevado la realización de este trabajo he podido constatar que una Tesis Doctoral es una empresa personal que se lleva a cabo colectivamente. Son muchas las personas que han hecho posible el trazo de este gráfico, los datos de aquella tabla o la redacción de esa introducción que tan complicada resultaba.

Concluido el trabajo, es el momento perfecto para agradecer toda la ayuda, el consejo y el ánimo recibidos durante todo este tiempo. Con seguridad me olvidaré de algunas personas a las que, de antemano, pido disculpas.

Quiero comenzar dando las gracias a mis directores, el Dr. Jesús Gadea Sáinz y la Dra. Verónica Calderón Carpintero. Me habéis permitido hacer el trabajo sin prisa, con el tiempo necesario, y me habéis dirigido con amabilidad y generosidad, proporcionándome esa perspectiva que solo los que estáis ahí sabéis aportar. Gracias, también, por el tiempo dedicado.

A José Luis Diez Campo, con el que trabajo mano a mano a diario y que, aportando sus puntos de vista en innumerables charlas, me ha facilitado avanzar en momentos en los que todo parecía estancado. Gracias por estar ahí y por la ayuda en la realización de los ensayos.

A José Miguel Solaguren-beascoa y Jorge Javier Hernández Bagaces por animarme en las numerosas reuniones al final de la jornada laboral, fundamentales para relajar la mente y cargar pilas para seguir.

A los profesores doctores del departamento, Ángel Rodríguez Saiz, Carlos Junco Petrement y Sara Gutiérrez González, y la Dra. Isabel Santamaría Vicario. Todos, en mayor o menor medida, me han aconsejado y apoyado, y a todos se lo quiero agradecer.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a las empresas privadas que, de diferentes formas, han facilitado mucho la realización de este trabajo.

A la pizarra CUPA GROUP, que me facilitó la localización de los acúmulos de residuos de distintos tipos de pizarra en la zona galaico-leonesa. De no ser por Miguel todavía no habría salido de aquel laberinto de caminos en un paisaje lunar.

Al Grupo Cementos Portland Valderrivas, por suministrar, generosa y desinteresadamente, los cementos necesarios para este y otros trabajos en nuestra Universidad. Quiero especialmente dar las gracias a David Alonso Maciá, responsable comercial y de Asistencia Técnica de la Zona Norte, por su amabilidad y accesibilidad para recibir nuestras peticiones y contestar nuestras dudas. Muchas gracias, David. Seguiremos colaborando.

A la empresa Comercial de Preresas SA (Copsa), actualmente incluida en el grupo Sika AG, y, especialmente, a Rodrigo Santamaría Pascual, responsable

del laboratorio de la planta de Montorio, en Burgos, por facilitarnos los aditivos empleados en esta Tesis y por la orientación sobre su composición y utilización.

A todos ellos  
GRACIAS

## Resumen

---

En esta Tesis se estudia la posibilidad de la utilización de los residuos de pizarra como áridos para la fabricación de morteros de cemento. De esta forma se pretende aportar un nuevo enfoque a la valorización de estos residuos.

Los parajes en torno a este tipo de industrias se encuentran severamente degradados por la proliferación de escombreras, que acumulan cientos de toneladas de desechos de pizarra. El aprovechamiento de estos materiales proporciona un doble beneficio: por un lado se restituyen los entornos de las zonas de aprovechamiento y, por otro, se obtiene rentabilidad de un material considerado inservible.

En la introducción general se expone el estado actual de la producción de pizarra y la generación de sus residuos en España, así como una revisión de los principales esfuerzos realizados para su reciclaje y reutilización.

Ya desde los primeros intentos de aprovechamiento de estos materiales en hormigones y morteros se manifiesta la principal problemática que presentan estos para su utilización como árido: la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato atribuida a las pizarras. Por ello se procede aquí a una revisión sobre lo que significan estas reactividades, sus técnicas de detección y medición y los métodos que se están desarrollando para la eliminación o disminución de estas reacciones, para, más adelante, abordar en profundidad el problema y las soluciones en los morteros diseñados.

El objetivo principal que se propone es conseguir morteros, fabricados íntegramente con árido procedente de la pizarra, que resulten competitivos en cuanto a calidad técnica y viabilidad económica. De esta manera, esta actividad podrá ser tenida en cuenta a la hora de valorizar los residuos de estas industrias.

Tras los objetivos y el capítulo experimental, donde se recogen los diferentes ensayos realizados, se aborda la caracterización de las materias primas utilizadas, destacando una completa descripción de las pizarras para su uso como árido en mortero.

La metodología empleada para el diseño de los morteros comprende la fabricación y estudio de dosificaciones iniciales, que solo contienen cemento y pizarra y que van a ser las muestras de referencia, la incorporación de aditivos para la mejora de las dosificaciones iniciales y la optimación de las dosificaciones mejoradas, mediante combinación de aditivos, para alcanzar productos con prestaciones similares a las de los morteros comerciales.

Con los resultados obtenidos se procede a la caracterización de los morteros que presentan las mejores aptitudes, así como a un posterior estudio de viabilidad económica para su explotación.

Tras lo expuesto en esta Tesis, se llega a la conclusión de que es técnicamente posible la fabricación de morteros con residuos de la industria extractiva de la pizarra, contribuyendo con ello a la eliminación de estos, mediante la introducción de un producto nuevo con posibilidad de beneficio económico.

**Palabras clave:** Residuos de pizarra, reactividad alcali-árido, mortero, cemento, árido, durabilidad, reciclado, valorización.

## Abstract

---

In this thesis, the possibility of reusing slate waste as an aggregate in the fabrication of cement mortars is studied. By doing so, the aim is to contribute to a new approach to the exploitation of these waste products.

The industrial landscapes around slate mines are highly degraded by the proliferation of slag heaps, in which hundreds of tons of slate waste accumulate. The exploitation of these materials provides a two-fold benefit: on the one hand, the areas surrounding the mining zone are reconstituted and, on the other, a material formerly considered of no use is rendered profitable.

The general introduction sets out a description of the present-day state of slate production and the generation of slate waste in Spain, as well as a review of the main activities involving its recycling and reuse.

Ever since the very first attempts to exploit these materials in concretes and mortars, the principal problem associated with their use as aggregates has been evident: alkali-silica and alkali-silicate reactivity associated with slates. A review is therefore conducted here on what these reactivities imply, their detection and measurement techniques and the methods that are under development for the elimination or reduction of these reactions, so as to approach in detail, at a later stage, the problem and the solutions in the mortar designs.

The principal objective that is proposed is the preparation of mortars that are entirely manufactured with aggregate from slate waste and that are competitive with regard to their technical quality and their economic viability. In doing so, this activity could be considered in any assessment of these industrial wastes.

Following the objectives and the experimental chapter, in which the different tests are described, a characterization of the raw materials is set out, highlighting a complete description of the slates for use as aggregate in mortar designs.

The methodology employed for the mortar design covers the manufacture and the study of the initial dosages, only containing cement and slate waste, which serve as the reference specimens; the incorporation of additives for the improvement of the initial dosages; and, their optimization, through further combinations of additives, to achieve products of a similar performance to commercial mortars.

On the basis of the results, characterizations of the most suitable mortars were performed, as well as a subsequent economic viability study for their exploitation.

In view of the contents of this Thesis, the conclusion is reached that the fabrication of mortars with waste from the slate-mining industry is technically viable, contributing thereby to their reuse, through the introduction of a new product with the possibility of economic benefits.

**Keywords:** Slate waste, alkali-aggregate reactivity, mortar, cement, aggregate, durability, recycling, valuation.

## Índice

---

<b>Capítulo 1: Introducción general</b> .....	1
<b>1.1. Introducción</b> .....	3
<b>1.2. Producción de pizarra en España. Generación de residuos</b> .....	3
<b>1.3. Marco normativo del tratamiento de residuos en la industria extractiva</b> .....	8
<b>1.4. Evolución histórica del reciclaje y reutilización de los residuos</b> .....	10
<b>1.5. Problemática de las pizarras: Reactividad álcali-árido</b> .....	14
1.5.1. Introducción .....	14
1.5.2. Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato .....	15
1.5.3. Progresos en los conocimientos de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato .....	17
1.5.4. Posibles soluciones a la reactividad de los áridos .....	20
<b>Capítulo 2: Objetivos</b> .....	25
<b>Capítulo 3: Experimental</b> .....	29
<b>3.1. Introducción</b> .....	31
<b>3.2. Ensayos físicos</b> .....	31
3.2.1. Preparación de los áridos.....	31
3.2.2. Densidad y absorción de agua del árido .....	33
3.2.3. Friabilidad de las arenas .....	36
3.2.4. Amasado de los morteros .....	37
3.2.5. Consistencia de los morteros .....	38
3.2.6. Densidad aparente del mortero fresco .....	40
3.2.7. Contenido en aire en el mortero fresco .....	41
3.2.8. Retención de agua en el mortero fresco .....	43
3.2.9. Período de trabajabilidad del mortero fresco .....	45
3.2.10. Fluidez del mortero fresco mediante el maniabilímetro .....	47

3.2.11. Resistencias mecánicas de los morteros: Flexión y compresión .....	53
3.2.11.1. Fabricación y curado de las muestras .....	50
3.2.11.2. Rotura a flexión y compresión de las muestras.....	51
3.2.12. Densidad aparente del mortero endurecido.....	52
3.2.13. Permeabilidad al vapor del mortero endurecido.....	53
3.2.13.1. Preparación y curado de las muestras .....	54
3.2.13.2. Procedimiento operatorio para el ensayo de permeabilidad al vapor.....	55
3.2.14. Absorción por capilaridad del mortero endurecido .....	57
3.2.15. Resistencia a la adhesión del mortero endurecido.....	58
3.2.16. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería ....	62
<b>3.3. Ensayos químicos .....</b>	<b>66</b>
3.3.1. Cloruros solubles en agua .....	66
3.3.2. Compuestos totales de azufre .....	68
3.3.3. Sulfatos solubles en ácido .....	70
<b>3.4. Ensayos de durabilidad .....</b>	<b>71</b>
3.4.1. Heladicidad.....	71
3.4.2. Ensayo al dióxido de azufre (Kesternich) .....	72
3.4.3. Resistencia a la cristalización de sales .....	75
<b>3.5. Ensayos de reactividad.....</b>	<b>77</b>
3.5.1. Introducción .....	77
3.5.2. Determinación de la reactividad por el método acelerado en probetas de mortero .....	77
3.5.3. Determinación de la reactividad por el método químico .....	79
3.5.4. Determinación de la reactividad potencial por el método de los prismas de hormigón.....	80
<b>3.6. Técnicas instrumentales .....</b>	<b>82</b>
3.6.1. Introducción .....	82
3.6.2. Estudio petrográfico .....	82

3.6.3. Fluorescencia de rayos X.....	83
3.6.4. Difracción de rayos X.....	84
3.6.5. Microscopía electrónica de barrido y espectrometría de dispersión de energía de rayos X.....	85
3.6.6. Tomografía axial computarizada (TAC).....	86

## **Capítulo 4: Caracterización de materias primas ..... 89**

<b>4.1. Introducción.....</b>	<b>91</b>
<b>4.2. Cemento.....</b>	<b>91</b>
4.2.1. CEM II/B-L 32,5 R.....	92
4.2.2. CEM IV/B (V) 32,5 N.....	94
<b>4.3. Agua.....</b>	<b>96</b>
<b>4.4. Árido.....</b>	<b>96</b>
4.4.1. Preparación de los áridos.....	97
4.4.2. Ensayos y resultados de los áridos.....	97
4.4.2.1. Estudio petrográfico.....	97
4.4.2.2. Fluorescencia de rayos X.....	111
4.4.2.3. Difracción de rayos X.....	112
4.4.2.4. Densidad y absorción.....	113
4.4.2.5. Friabilidad.....	114
4.4.2.6. Cloruros solubles en agua.....	114
4.4.2.7. Sulfatos totales.....	114
4.4.2.8. Sulfatos solubles en ácido.....	114
4.4.2.9. Reactividad árido-álcali.....	114
4.4.2.10. Conclusiones en cuanto a la caracterización de los áridos.....	115
<b>4.5. Aditivos.....</b>	<b>117</b>
4.5.1. Cal.....	118
4.5.1.1. Cal aérea.....	118
4.5.1.2. Cal hidráulica natural.....	119
4.5.2. Plastificantes-Aireantes.....	121

4.5.3. Superplastificante .....	122
4.5.4. Plastificante .....	122
4.5.5. Retenedor de agua .....	123
4.5.6. Polímeros dispersables .....	124

## **Capítulo 5: Diseño de morteros con pizarra.**

<b>Dosificaciones iniciales .....</b>	<b>127</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>129</b>
<b>5.2. Diseño preliminar de morteros con pizarra.....</b>	<b>130</b>
5.2.1. Selección de la curva granulométrica.....	130
5.2.2. Pizarras utilizadas para el diseño de morteros .....	132
5.2.3. Dosificación de los morteros iniciales .....	132
5.2.3.1. Consideraciones técnicas.....	132
5.2.3.2. Composición de los morteros según su resistencia .....	135
5.2.3.2.1. Procedimiento experimental .....	135
5.2.3.2.2. Denominación de los morteros .....	136
5.2.3.2.3. Resultados obtenidos .....	137
5.2.3.2.3.1. Consistencia .....	137
5.2.3.2.3.2. Resistencia a compresión.....	140
5.2.4. Caracterización de los morteros iniciales .....	141
5.2.4.1. Propiedades del mortero fresco .....	141
5.2.4.1.1. Densidad aparente.....	141
5.2.4.1.2. Contenido en aire .....	142
5.2.4.1.3. Retención de agua .....	142
5.2.4.1.4. Determinación del período de trabajabilidad.....	143
5.2.4.2. Propiedades del mortero endurecido .....	143
5.2.4.2.1. Resistencias mecánicas .....	144
5.2.4.2.2. Densidad aparente.....	144
5.2.4.2.3. Permeabilidad al vapor .....	146
5.2.4.2.4. Absorción por capilaridad.....	147
5.2.4.2.5. Resistencia a la adhesión .....	148

5.2.4.2.6. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería	150
5.2.4.3. Durabilidad.....	151
5.2.4.3.1. Ensayo al dióxido de azufre (Kesternich).....	151
5.2.4.3.2. Heladicidad .....	154
5.2.4.3.3. Resistencia a la cristalización de sales .....	158
5.2.4.3.4. Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato .....	162

## **Capítulo 6: Reactividad álcali-árido de las pizarras en los morteros**..... 163

### **6.1. Introducción**..... 165

### **6.2. Estudio de la reactividad de las pizarras** ..... 165

6.2.1. Determinación de la reactividad de las pizarras por el método químico .....	165
6.2.1.1. Preparación de las muestras.....	165
6.2.1.2. Tratamiento alcalino .....	166
6.2.1.3. Determinación de la sílice en disolución.....	166
6.2.1.4. Determinación del sodio en disolución .....	168
6.2.1.5. Evaluación de la reactividad potencial del árido .....	169
6.2.2. Reactividad de las pizarras por el método acelerado en probetas de mortero.....	173
6.2.2.1. Preparación de las muestras.....	173
6.2.2.2. Preparación de las probetas de mortero .....	173
6.2.2.3. Realización del ensayo y resultados.....	175
6.2.2.4. Inspección visual de las probetas de mortero .....	178
6.2.2.5. Análisis SEM-EDX de las probetas de mortero .....	181
6.2.3. Reactividad potencial por el método de los prismas de hormigón .....	185
6.2.3.1. Preparación de las probetas de hormigón .....	187
6.2.3.2. Realización del ensayo y resultados.....	189
6.2.3.3. Análisis SEM-EDX de las probetas de hormigón .....	192

6.2.3.4. Análisis mediante tomografía axial computarizada (TAC)...	198
6.2.3.5. Conclusiones acerca de la reactividad de las pizarras .....	200
6.2.4. Tentativas para la eliminación o disminución de la reactividad álcali-árido en las pizarras .....	201
6.2.4.1. Uso de cementos con bajo contenido en álcalis .....	201
6.2.4.2. Uso de aditivos de litio .....	203
6.2.4.2.1. Ensayo acelerado en probetas de mortero con aditivos de litio .....	204
6.2.4.2.2. Ensayo de los prismas de hormigón con aditivos de litio .....	208
6.2.4.3. Uso de cementos con adiciones minerales .....	213
<b>6.3. Reactividad de las pizarras en los morteros iniciales.....</b>	<b>215</b>
<b>Capítulo 7: Mejora de los morteros mediante inclusión de aditivos.....</b>	<b>217</b>
<b>7.1. Introducción .....</b>	<b>219</b>
<b>7.2. Inclusión de aditivos en los morteros .....</b>	<b>219</b>
7.2.1. Consideraciones iniciales .....	219
7.2.2. Disminución del agua de amasado en el mortero .....	220
7.2.2.1. Dosificaciones estudiadas.....	220
7.2.2.2. Resultados obtenidos.....	221
7.2.3. Variaciones en las resistencias mecánicas .....	222
7.2.4. Variaciones en las densidades aparentes y en el contenido en aire del mortero.....	223
7.2.5. Variaciones en la resistencia a la adhesión del mortero....	225
7.2.6. Variaciones en la retención de agua en el mortero fresco.	227
7.2.7. Variaciones en el período de trabajabilidad.....	228
7.2.8. Valoración de las modificaciones realizadas .....	229
7.2.8.1. Relación agua/cemento vs. resistencia a compresión.....	229
7.2.8.2. Densidad y contenido en aire del mortero fresco .....	230

7.2.9. Análisis y evaluación de los resultados obtenidos con la inclusión de aditivos.....	232
--	-----

**7.3. Estudio de mejoras mediante combinación de aditivos en el mortero ..... 234**

7.3.1. Combinaciones de aireantes y polímeros dispersables ....	234
7.3.1.1. Dosificaciones .....	234
7.3.1.2. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 1 .....	236
7.3.1.3. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 4.....	242
7.3.2. Combinaciones de aireantes y retenedor de agua.....	247
7.3.2.1. Dosificaciones .....	247
7.3.2.2. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 1 .....	248
7.3.2.3. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 2.....	251
7.3.3. Combinaciones de aireantes y cales .....	253
7.3.3.1. Dosificaciones .....	254
7.3.3.2. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 1 .....	255
7.3.3.3. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 4.....	261

**Capítulo 8: Caracterización de los morteros mejorados ..... 267**

**8.1. Introducción..... 269**

**8.2. Resultados de los ensayos de los morteros frescos ..... 271**

8.2.1. Análisis de los resultados de los ensayos en los morteros frescos .....	272
8.2.1.1. Relación agua/cemento.....	272
8.2.1.2. Contenido de aire.....	272
8.2.1.3. Densidad del mortero fresco .....	273
8.2.1.4. Retención de agua .....	274
8.2.1.5. Período de trabajabilidad.....	274

**8.3. Resultados de los ensayos de los morteros endurecidos ..... 274**

8.3.1. Ensayos sobre morteros endurecidos a los 28 días de curado .....	275
8.3.2. Análisis de los resultados de los morteros endurecidos ....	277
8.3.2.1. Densidad del mortero endurecido.....	277
8.3.2.2. Resistencias mecánicas, compresión .....	278
8.3.2.3. Resistencia a la adhesión .....	279
8.3.2.4. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería .....	280
8.3.2.5. Absorción por capilaridad .....	281
8.3.2.6. Permeabilidad al vapor de agua.....	283
8.3.3. Ensayos de durabilidad de los morteros endurecidos .....	284
8.3.3.1. Ensayo al dióxido de azufre (kesternich) .....	284
8.3.3.2. Heladicidad .....	288
8.3.3.3. Resistencia a la cristalización de sales .....	294
8.3.3.4. Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato .....	300
<b>Capítulo 9: Valoración económica de los morteros seleccionados .....</b>	<b>303</b>
<b>9.1. Introducción .....</b>	<b>305</b>
<b>9.2. Costes de las materias primas de los morteros .....</b>	<b>305</b>
<b>9.3. Estimación de costes de producción de los morteros....</b>	<b>309</b>
<b>Capítulo 10: Conclusiones y futuras líneas de investigación .....</b>	<b>315</b>
<b>10.1. Conclusiones .....</b>	<b>317</b>
<b>10.2. Futuras líneas de investigación .....</b>	<b>318</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>321</b>
<b>ANEXO I: Fichas posibles de los morteros mejorados .....</b>	<b>335</b>

## **Capítulo 1: Introducción general**

---



## 1.1. Introducción

Los enormes acúmulos de pizarra, resultado de los rechazos de la industria extractiva de esta roca, generan paisajes estériles donde no crece ningún tipo de vida vegetal y donde, en muchos casos se produce contaminación de acuíferos, como se ilustra en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Agua embalsada contaminada en una escombrera

Desde esta perspectiva, se analizan las posibilidades para la valorización de los residuos de pizarra, de manera que pudieran ser integrados como materia prima en sistemas de producción y, de esta manera, ser retirados de nuestro medio ambiente, permitiendo su adecuada recuperación.

En la presente Tesis se estudia la viabilidad de estos residuos en la fabricación de morteros premezclados. Se investigan sistemas que posibiliten la utilización de estos materiales y, a partir de la constatación de que estos morteros son posibles, se procede al diseño y caracterización de estos, de manera que se logren productos competitivos con los que existen en el mercado, contribuyendo, así, a que los desechos de pizarra puedan considerarse materias primas atractivas para su uso en nuevos materiales de construcción y sean eliminados de los parajes naturales que ocupan.

## 1.2. Producción de pizarra en España. Generación de residuos

Atendiendo a los números, existe cierta disparidad en cuanto a la generación de residuos de pizarra en las canteras. Juan Ramón Vidal Romaní, catedrático del Instituto Geológico de la Universidad de la Coruña, dice que

“Una mina solo aprovecha el 4% del material que extrae”, “Los cálculos dicen que 18 millones de toneladas de residuos, que ocupan 10.000 metros cúbicos, se acumulan año tras año”<sup>1</sup>. Por otro lado, desde la Junta de Castilla y León se estima que “existen alrededor de 3 millones de toneladas de residuos generados por la actividad pizarrera en esta comunidad, fundamentalmente en su extremo noroccidental, la provincia de Zamora y la comarca leonesa de El Bierzo”<sup>2</sup>. Desde la misma fuente, el Viceconsejero de Desarrollo Sostenible de esta comunidad estima que entre el 70 y el 80% de la pizarra producida se convierte en residuo. Si se consulta la misma noticia pero recogida en otro medio, se puede leer que fuentes de la Junta de Castilla y León indican que “en el sector de la pizarra apenas se aprovecha un porcentaje de en torno al diez por ciento de la roca extraída”<sup>3</sup>.

De cualquier forma, las cifras hablan de un amplio problema medioambiental ligado a un sector industrial de gran importancia en España, ya que este país es el principal referente mundial en la producción y exportación de pizarra.

Los datos de producción de pizarra ornamental en España en el año 2012, ofrecidos por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo<sup>4</sup>, hablan de 666.413 toneladas suministradas, con un valor de 215.228.840 €.

Si se supone una generación de residuos del 70%, caso más favorable de los mencionados anteriormente, se estaría hablando de una generación de 1.554.964 toneladas de residuos en ese año.

En los últimos años, la producción de pizarra se ha mantenido, con ciertos altibajos, entre seiscientas mil y un millón de toneladas, mientras que sectores muy importantes de la industria de las rocas ornamentales, como granito y mármol, veían descender su producción de forma importante, sin duda debido a la fuerte crisis sufrida en el sector de la construcción en estos años (Figura 1.2).

---

<sup>1</sup> El País digital. Las pizarreras acumulan cada año 18 millones de toneladas de residuos. Disponible en Web: <<http://elpais.com/diario/2011/03/05/galicia/>>. Marzo de 2011.

<sup>2</sup> Leonoticias.com. El futuro de la pizarra. Disponible en Web: <<http://www.leonoticias.com/frontend/leonoticias/El-Futuro-De-La-Pizarra-vn57543-vst208>>. 19/10/2010.

<sup>3</sup> Diario de León.es. La pizarra sobrevivirá si logra reciclar tres millones de toneladas de residuos. Disponible en Web: <[http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/pizarra-sobrevivira-si-logra-reciclar-tres-millones-toneladas-residuos\\_559805.html](http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/pizarra-sobrevivira-si-logra-reciclar-tres-millones-toneladas-residuos_559805.html)>. Octubre de 2010.

<sup>4</sup> Estadística Minera de España 2012. Dirección Gral. de Política Energética y Minas. Secretaría de Estado de Energía. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Disponible en Web: <<http://www.minetur.gob.es/energia/mineria/Estadistica/Datos%20anuales/anual%2012.pdf>>

A pesar de no ser unas cantidades de producción muy altas, en comparación con el resto de rocas ornamentales, los datos de 2012, referencia más reciente publicada por el Ministerio, colocan la industria de la pizarra en el primer lugar en cuanto a valor económico, a gran distancia de la segunda, la industria de la caliza ornamental, con un valor de producción de 84.392.741 €.

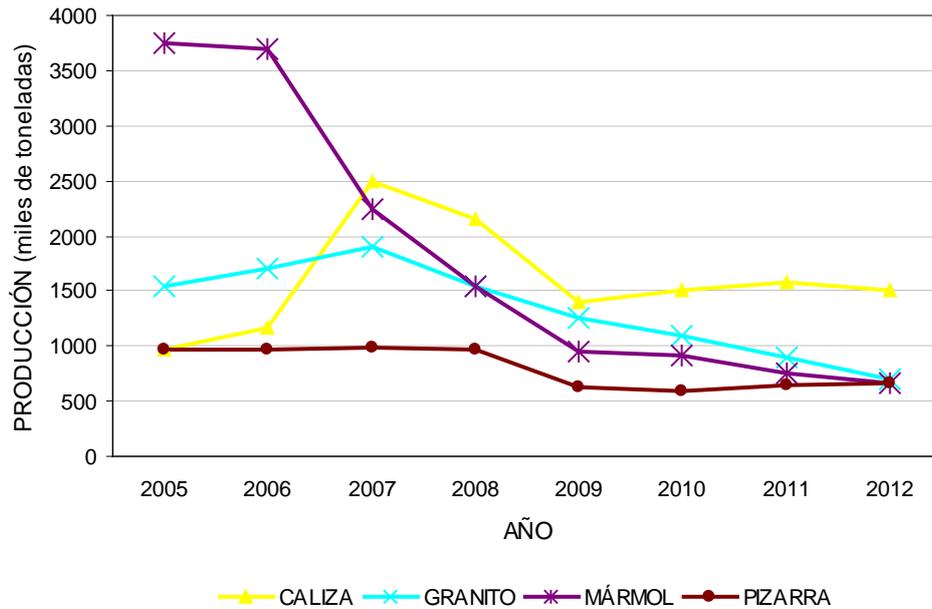


Figura 1.2. Producción de rocas ornamentales desde el año 2005 al 2012

En la Figura 1.3 se incluye un gráfico con las toneladas producidas de las distintas rocas ornamentales y su valor de producción en el año 2012. Los principales usos a los que se destina este tipo de pizarra en España son, en orden de mayor a menor producción, material para cubiertas y tablas, pavimentos y aplacados, y bloques.

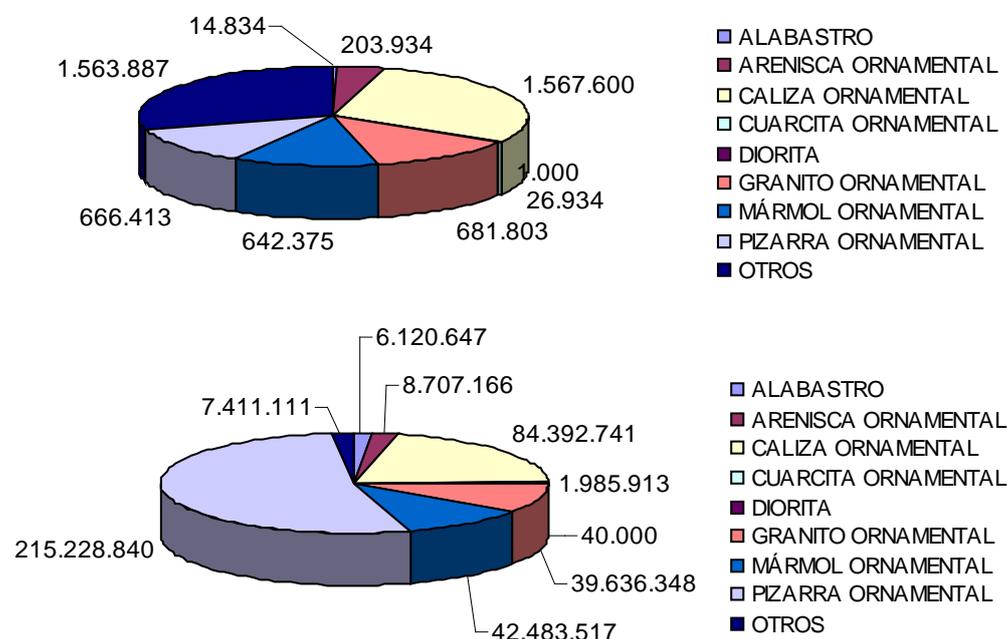


Figura 1.3. Producción de rocas ornamentales en toneladas (superior) y su valor en euros (inferior) en 2012

En cuanto a la distribución de la producción en el territorio español, destacan tres provincias como mayores productoras: Ourense, León y Lugo (Figura 1.4). En el 2012 en estas tres provincias se acumulaban 69 de las 104 explotaciones de pizarra en funcionamiento, empleando a 2.887 de los 3.175 trabajadores del sector contabilizados en España ese año.

PROVINCIA	Nº EXPLOTACIONES	TONELADAS	EUROS
ALMERIA	2	2.500	155.000
BADAJOS	1	7.200	379.246
BARCELONA	6	16.573	363.200
CORUÑA	7	20.889	4.140.053
GRANADA	1	518	31.127
GUIPÚZCOA	1	240	62.280
LEÓN	29	219.482	67.144.431
LUGO	17	41.142	18.771.648
OURENSE	37	306.797	116.709.082
SEGOVIA	8	24.630	1.710.470
ZAMORA	2	13.686	5.164.689

Figura 1.4. Producción de pizarra en 2012. Sectorización por provincias

Para ejemplificar la importancia de la exportación de la pizarra en el sector se incluyen datos recogidos en el año 2008. En la Figura 1.5 se incluyen los porcentajes de producción de pizarra exportada por los principales países productores así como el valor de exportación que supusieron estas producciones en el contexto internacional<sup>5</sup>. Ese año España exportó el 25,2% del peso total de toneladas del mercado mundial, lo que supone una cantidad de 644.500 toneladas. Pero esta cantidad de material supuso el 48,8% del valor de exportación de este producto en el mundo, lo que indica que el precio medio por tonelada es superior al conjunto de la competencia, principalmente China y Brasil.

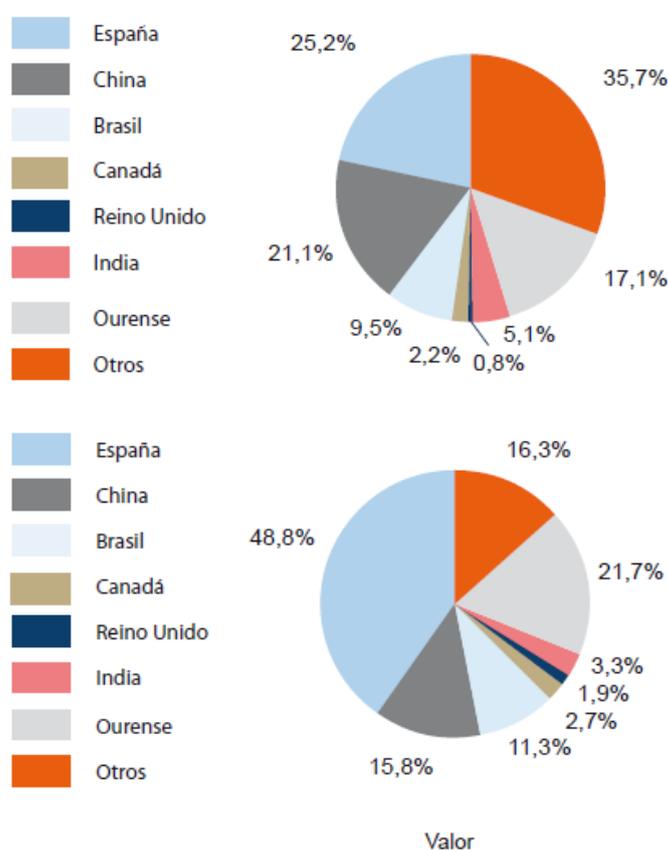


Figura 1.5. Producción de pizarra exportada por los principales países productores y su valor de exportación en el año 2008

<sup>5</sup> Torres y Carrera consultores de comunicación. Pizarra: Magnitudes básicas y tendencias. Julio de 2010.

### **1.3. Marco normativo del tratamiento de residuos en la industria extractiva**

Existe muy poca normativa en cuanto a la recuperación y reutilización de escombros a partir de la obtención de pizarra concretamente o, más ampliamente, de la industria extractiva en general.

Como legislación específica se encuentra el Real Decreto 2994/82 de 15 de octubre, sobre la restauración del espacio natural afectado por actividades mineras<sup>6</sup>, en el que se insta a la elaboración por parte de la empresa extractora de un Plan de medidas preventivas y correctoras para recuperar el entorno natural afectado y previsiones para el almacenamiento de los residuos mineros generados, pero no aclara nada sobre el reciclaje de residuos generados por la actividad extractiva.

La Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas, establece la obligación de las entidades explotadoras de la realización de un Plan de Gestión de Residuos Mineros, que tiene como objetivo, entre otros, el de “fomentar la recuperación de los residuos de extracción mediante su reciclado, reutilización o valorización cuando ello sea respetuoso con el medio ambiente”<sup>7</sup>. Se hace ya una primera referencia, aunque bastante somera, a la necesidad de buscar utilidades a unos materiales que, no siendo aptos para el uso inicial por el que se han extraído, pueden resultar adecuados o incluso idóneos en otros procesos industriales en los que pueden ser introducidos, y se le atribuye a la empresa explotadora el cometido de promover su recuperación.

Para lograr estos objetivos se observan medidas como promover mecanismos que permitan poner en contacto a poseedores de los RIE (residuos de la industria extractiva), en particular de los históricos, con empresas que puedan reciclarlos o valorizarlos<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup> España. Real Decreto 2994/82, de 15 de octubre, sobre la restauración del espacio natural afectado por actividades mineras. Boletín Oficial del Estado, 15 de noviembre de 1982, núm. 274, p. 31246-31247.

<sup>7</sup> Unión Europea. Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE. Diario Oficial de la Unión Europea, de 4 de noviembre de 2006, L 102/15.

<sup>8</sup> España. Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015. Boletín Oficial del Estado, 26 de febrero de 2009, Núm. 49, Sec. I, Pág. 19893-20016.

En este Plan no solo se expone la necesidad del reciclaje sino que se incluye una cantidad de residuo a recuperar en un plazo determinado y se indica cómo alcanzar dichos objetivos. También se da a entender que existen ya usos adecuados para los residuos de pizarra y empresas que se dedican a la valorización de estos materiales.

A nivel autonómico se cuenta con el Plan de Gestión de Residuos Industriales y Suelos Contaminados de Galicia 2000-2006, aprobado por Resolución de 21 de noviembre de 2001<sup>9</sup>. En este plan se incluían algunos usos para el reciclado de lodos de pizarra, como pueden ser fabricación de cementos, detergentes y pinturas, y estimaban una reducción de dichos lodos para el año 2006 de 55.000 toneladas, lo que suponía un 25% de los lodos acumulados en las escombreras.

La evolución de la normativa denota un progresivo aumento de la concienciación en cuanto a la necesidad del reciclaje para conseguir la recuperación de zonas devastadas por la acumulación de desechos de pizarra. Tanto es así que administraciones públicas, como es el caso de la Junta de Castilla y León, asocian la continuidad de las explotaciones de pizarra a su capacidad para reciclar los residuos que producen al extraer la roca y abogan por “que los residuos dejen de convertirse en un problema para que pasen a ser una materia prima y aporten un valor añadido a las empresas”<sup>3</sup>. Para potenciar estas actuaciones plantean, por ejemplo, la inclusión de los usos de nuevos materiales realizados con residuos de pizarra en los pliegos de condiciones de la construcción de obra pública en la Comunidad Autónoma<sup>2</sup>.

El tema toma gran trascendencia política en la Comunidad, hasta el punto de que en febrero del año 2011 se discute, en la Comisión de Medio Ambiente de las Cortes de Castilla y León, la instauración de un plan sobre la gestión integral de los residuos procedentes de las explotaciones de pizarra<sup>10</sup>. En dicha Comisión no se consiguieron acuerdos debido a las importantes diferencias de los dos partidos mayoritarios a la hora de afrontar el problema, lo cual no facilita la aproximación a la posible solución.

---

<sup>9</sup> Galicia. Resolución de 21 de noviembre de 2001 por la que se acuerda hacer público el Plan de Gestión de Residuos Industriales y Suelos Contaminados de Galicia. Diario Oficial de Galicia, 18 de diciembre de 2001, Núm. 243, Pág. 16.082.

<sup>10</sup> Diario de León.es. El plan integral para residuos de pizarra enfrenta al PSOE y al PP. Disponible en Web: < [http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/plan-integral-residuos-pizarra-enfrenta-psoe-pp\\_585497.html](http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/plan-integral-residuos-pizarra-enfrenta-psoe-pp_585497.html)>. Febrero de 2011.

A nivel internacional, países como el Reino Unido, donde se encuentran antiguas canteras de pizarra con grandes acúmulos de desechos, sobre todo en el País de Gales, han desarrollado iniciativas legislativas, como la aplicación de impuestos sobre la extracción de áridos y tasas a las escombreras, que han propiciado la investigación en el reciclaje de desechos de pizarra, exentos de estos impuestos, para su uso en la industria de la construcción. Esto ha propiciado que muchos de los avances conseguidos a nivel mundial en este campo se deban a trabajos realizados por investigadores británicos.

#### **1.4. Evolución histórica del reciclaje y reutilización de los residuos de pizarra**

Al igual que en el tema normativo, no existe una extensa bibliografía científica en lo que se refiere a usos de desechos de pizarra ya que, hasta hace relativamente poco tiempo, ha primado la extracción de las mayores cantidades de roca posible frente a la debida planificación, la explotación racional y sostenible de los recursos medioambientales y la recuperación de las zonas explotadas. Así, las investigaciones llevadas a cabo en este campo se remontan prácticamente a los últimos 35 años, cobrando una especial relevancia en la última década debido, muy posiblemente, al cambio global de mentalidad en cuanto a la explotación sostenible de los recursos naturales, que comienza a manifestarse en la orientación de las políticas de los países afectados.

Las primeras referencias que se encuentran en el reciclado de residuos de pizarra se remontan a finales de los 70 cuando en el Reino Unido se realizan prometedores estudios acerca de la introducción de polvo de pizarra, en distintas proporciones, en la fabricación de hormigón celular<sup>11-12</sup>. En este caso, la pizarra se introduce como material que proporciona sílice para la reacción puzolánica que se produce con el hidróxido de calcio presente en el hormigón. Esto ocurre de forma muy rápida en el autoclave debido a las altas presiones y temperaturas a las que se somete al hormigón. El resultado es la aparición de Tobermorita de la variante de 1,1 nm.

---

<sup>11</sup> Watson, K. L., Eden, N. B., Farrant, J. R. Autoclaved aerated materials made from slate powder and Portland cement. *Precast Concrete*. 8 (2) (1977): 81-85.

<sup>12</sup> Eden, N. B., Manthorpe, A. R., Miell, S. A., Szymanek, P. H., Watson, K. L. Autoclaved aerated concrete from slate waste Part 1: Some property/density relationships. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 2 (2) (1980): 95-100.

En el 2000 Butler et al. publican un trabajo sobre el uso de residuos de pizarra como árido para la fabricación de hormigón. En su investigación realizan diferentes dosificaciones de hormigón con árido procedente de escombreras de pizarra y seleccionan algunas con las que consiguen resistencias comparables a las de hormigones con áridos convencionales. Pero en este estudio también se pone de manifiesto los riesgos que el uso de estos residuos conlleva para la fabricación de hormigón en cuanto a la durabilidad de éste por posibles procesos de reactividad álcali-árido entre la pizarra y los álcalis del cemento<sup>13</sup>.

En los primeros años de este siglo se han realizado muchos estudios para la introducción de residuos de pizarra en la industria de la cerámica. En este caso son los investigadores portugueses los que han desarrollado mayor cantidad de bibliografía sobre el tema. El material, introducido de nuevo en forma de polvo, se somete a altas presiones para conseguir una pieza compacta que se pueda manipular adecuadamente. Seguidamente se procede a la sinterización de la pieza.

En este tratamiento se alcanzan temperaturas ligeramente inferiores a las de fusión del compuesto mineral principal de la pizarra de manera que se produce un fenómeno de soldadura en estado sólido de las partículas del material dando lugar a una pieza dura, compacta y homogénea<sup>14-17</sup>.

Avanzando en la investigación se consigue una mejora de los materiales cerámicos anteriormente referidos mediante la inclusión de otros materiales de desecho como son los lodos ricos en hidróxidos de aluminio provenientes de los tratamientos físico-químicos de las aguas residuales generadas en los procesos de acabado superficial de la industria de la perfilería de aluminio.

---

<sup>13</sup> Butler, A. K., Leek, D. S., Johnson, R. A. The potential for using some alternative aggregates in structural concrete. *Structural Engineer*. 78(22) (2000): 22-25.

<sup>14</sup> Barreiros, F. M., Vieira, M. T. Powder injection moulding to recover slate wastes. *Key Engineering Materials*. 230-232 (2002): 247-250.

<sup>15</sup> Catarino, L., Sousa, J., Martins, I. M., Vieira, M. T., Oliveira, M. M. Ceramic products obtained from rock wastes. *Journal of Materials Processing Technology*. 143-144 (1) (2003): 843-845.

<sup>16</sup> Campos, M., Velasco, F., Martinez, M. A., Torralba, J. M. Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 24 (5) (2004): 811-819.

<sup>17</sup> Souza, L. P. D., Mansur, H. S. Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes. *Journal of Materials Processing Technology*. 145 (1) (2004): 14-20.

La mezcla de polvo de pizarra con lodos de aluminio en una proporción molar de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$  de 2:1, sometida a temperaturas de sinterización en torno a 1300 °C el tiempo adecuado, da lugar a la aparición de mullita incluida en la fase vítrea de los compuestos cerámicos resultantes<sup>18-22</sup>.

La mullita es un silicato de aluminio con estructura en forma de aguja, baja conductividad y excelentes resistencias al choque térmico y a la deformación con carga, con la que se consiguen productos que alcanzan resistencias térmicas y mecánicas mucho más elevadas que las piezas cerámicas obtenidas a partir de las arcillas o del polvo de pizarra únicamente (resistencias a flexión mayores de 100 MPa).

Actualmente, el grupo de trabajo del investigador Jonathan E. Oti, del Reino Unido, lleva a cabo diferentes líneas de investigación centradas en el aprovechamiento de los residuos de pizarra, muy abundantes en la zona de Gales<sup>23</sup>.

Una de estas líneas que desarrollan es la producción de ladrillos de arcilla con la incorporación de pizarra en su composición<sup>24</sup>. En este trabajo se hacen distintas mezclas de arcilla como material principal, con residuos de pizarra en porcentajes de alrededor del 6%, escoria granulada de horno alto como estabilizador y conglomerantes de tipo cal o cemento como activadores. Todo ello debidamente amasado con la cantidad de agua adecuada para posteriormente, mediante prensado, realizar las probetas que una vez curadas se someten a estudio.

---

<sup>18</sup> Matins, I. M., Sousa, J., Catarino, L., Vieira, M. T., Oliveira, M. M. The formation of mullite from rock wastes containing alumina and silica. *Key Engineering Materials*. 230-232 (2002): 380-383.

<sup>19</sup> Martins, I. M., Xavier, C., Mendonca, M. H., Oliveira, M. M. New ceramic products from slate and aluminium sludge wastes. *Advanced Materials Forum III*, Pts 1 and 2. Trans Tech Publications Ltd. Zurich-Uetikon. 514-516 (2006): 1695-1699.

<sup>20</sup> Vieira, S. C., Ramos, A. S., Vieira, M. T. Mullitization kinetics from silica- and alumina-rich wastes. *Ceramics International*. 33 (1) (2007): 59-66.

<sup>21</sup> Oliveira, F. A. C., Livramento, V., Delmas, F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes. I. Densification behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*. 196 (1-3) (2008): 101-108.

<sup>22</sup> Oliveira, F. A. C., Livramento, V., Delmas, F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes. II: Mechanical behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*. 195 (1-3) (2008): 255-259.

<sup>23</sup> Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Snelson, D. G., Bai, J. Applications of slate waste material in the UK. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*. 163 (1) (2010): 9-15.

<sup>24</sup> Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Bai, J. Unfired clay masonry bricks incorporating slate waste. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*. 163 (1) (2010): 17-27.

Las conclusiones a las que se llega en esta investigación es que la tecnología de la arcilla sin cocer usando escoria granulada como estabilizador e incorporando residuos de la industria de la pizarra ofrece una alternativa viable a los tradicionales ladrillos de arcilla cocida, con unos beneficios medioambientales muy superiores a estos en cuanto a reutilización de materiales de desecho y disminución de gases de efecto invernadero.

Oti et al. Analizan, además, la posibilidad de introducir residuos de pizarra en el hormigón<sup>25</sup>. En su investigación trituran y clasifican por tamaños la pizarra y mezclan diferentes dosificaciones con distintos porcentajes de árido grueso procedente de los residuos de pizarra y arena silícea. Como hormigón de referencia con el que comparar las dosificaciones, emplean un hormigón con árido grueso calizo y arena silícea. A todas estas muestras se les realizan diferentes ensayos físicos como la consistencia en estado fresco, la resistencia a compresión, la resistencia a tracción indirecta y el módulo de elasticidad.

Atendiendo a los resultados obtenidos, los investigadores llegan a la conclusión de que es posible la realización de hormigón incorporando residuos de pizarra como árido, a pesar de la forma lajosa de estos. Las propiedades físicas medidas en este estudio empeoran ligeramente en comparación con el hormigón de referencia, pero pueden ser suficientes para la fabricación de hormigones de resistencias medias-bajas para la industria de la construcción.

Desde China también se realizan trabajos centrados en el reciclado de desechos de pizarra<sup>26</sup>. En este caso se basan en la posibilidad de mejorar los cementos incluyendo porcentajes de polvo de pizarra como material con carácter puzolánico. Este uso resulta muy interesante ya que en China, con una economía en fuerte crecimiento, se producen millones de toneladas de cemento al año. La inclusión de polvo de pizarra resultaría en una importante reducción de estos residuos unida a un beneficio económico, ya que disminuiría de manera importante el precio final de los cementos mejorando sus características mecánicas. De hecho, consiguen aumentos de hasta un 14% de resistencia a compresión en los morteros con un reemplazo del 15% del clinker en el cemento.

---

<sup>25</sup> Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Bai, J., Delpak, R., Snelson, D. G. Engineering properties of concrete made with slate waste. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*. 163 (3) (2010): 131-142.

<sup>26</sup> Ding, Y., Jalali, S., Niederegger, C. Recycling of metamorphic rock waste in ecological cement. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*. 163 (3) (2010): 143-148.

Por último, cabe destacar la investigación llevada a cabo en las Escuelas Técnicas Superiores de las Universidades de Alcalá de Henares y Politécnica de Madrid, en la que se estudia la posibilidad de introducir residuos de pizarra triturados como conglomerante en mortero autonivelante para soleras<sup>27</sup>.

Se realizan ensayos comparativos con pastas con altos porcentajes de sustitución del cemento por polvo de pizarra, tomando como referencia una pasta de cemento y agua al uso.

Se llega a la conclusión de que existe actividad química entre el cemento y la pizarra y, mediante la inclusión de aditivos adecuados, se consigue un mortero autonivelante con consistencia fluida, resistencias mecánicas suficientes, baja retracción, que no se segrega y que incluye pizarra como aglutinante y como árido.

Más recientemente, Frías et al. avanzan en la misma idea estudiando el comportamiento de los residuos (finos) de pizarra activados con calor, para su uso como adiciones puzolánicas para la industria de los cementos. Los resultados de sus ensayos indican la viabilidad del empleo de residuos de pizarra<sup>28</sup>.

## **1.5. Problemática de las pizarras: Reactividad álcali-árido**

### **1.5.1. Introducción**

La reactividad álcali-árido en los morteros de pizarra se tratará de forma independiente debido al importante desafío que supone para el uso que se pretende de estos materiales.

Como se ha indicado anteriormente, las pizarras se muestran como áridos potencialmente reactivos frente a los álcalis de los cementos. Esta característica dificulta de manera importante el uso y aprovechamiento de estos materiales para la fabricación de hormigones y morteros ya que conlleva la rápida degradación de éstos comprometiendo sensiblemente su durabilidad.

En esta Tesis se analiza en profundidad el comportamiento de las pizarras frente a los álcalis en las mezclas con conglomerantes hidráulicos y se estudian las posibilidades para evitar o minimizar estas reactividades de manera que las pizarras sean aprovechables para la fabricación de morteros, objetivo principal en este trabajo.

<sup>27</sup> Barluenga, G., Hernandez-Olivares, F. Self-levelling cement mortar containing ground slate from quarrying waste. *Construction and Building Materials*. 24 (9) (2010): 1601-1607.

<sup>28</sup> Frías, M., de la Villa, R. V., Garcia, R., de Rojas, M. I. S., Valdes, A. J. The Influence of Slate Waste Activation Conditions on Mineralogical Changes and Pozzolanic Behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. 96 (7) (2013): 2276-2282.

Previamente al estudio del comportamiento de las pizarras se hace una síntesis de los conocimientos adquiridos y las técnicas empleadas en lo referente a la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato, desde su descubrimiento en los años 40 del siglo pasado hasta la actualidad.

### 1.5.2. Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato

De los distintos tipos de reactividades que se pueden observar en los áridos este trabajo se centra en la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato, ya que es la que afecta a las pizarras por su composición mineralógica.

Este tipo de reacción química se da entre ciertos áridos silíceos y los hidróxidos alcalinos de los cementos en hormigones y morteros, en condiciones ambientales de alta humedad. El resultado es el agrietamiento de estos hormigones y morteros y la paulatina degradación de las estructuras que constituyen estos materiales.<sup>29-31</sup>

Un ejemplo del deterioro característico que produce esta reactividad se puede ver en la Figura 1.6, donde se observan con claridad las fisuras que se extienden de forma desordenada en la superficie del hormigón de una presa. Esta fisuración superficial caótica es la exteriorización de las roturas que se producen en el interior del hormigón.

---

<sup>29</sup> Marfil, S. A., Maiza, P. J. Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction: A petrographic study of three cases in Argentina. *Cement and Concrete Research*. 31 (2001) 1017-1021.

<sup>30</sup> Fernandes, I., Noronha, F., Teles, M. Examination of the concrete from an old Portuguese dam: Texture and composition of alkali-silica gel. *Materials Characterization*. 58 (2007) 1160-1170.

<sup>31</sup> Herrador, M. F., Martínez-Abella, F., Rabuñal Dopico, J. R. Experimental evaluation of expansive behavior of an old-aged ASR-affected dam concrete: methodology and application. *Materials and Structures*. (2008) 41:173-188.

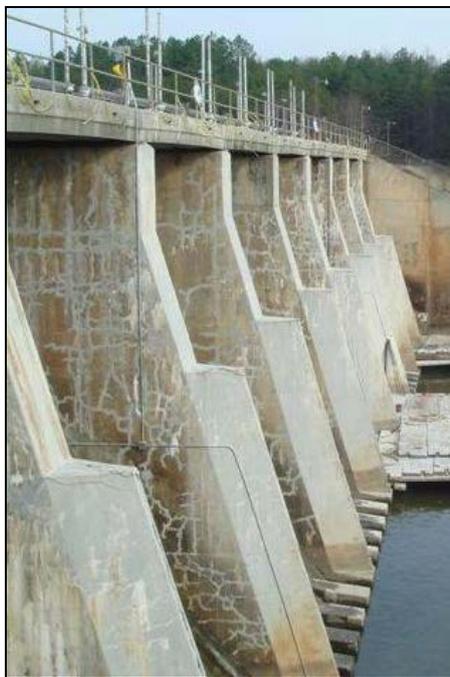


Figura 1.6. Hormigón dañado por reactividad árido álcali en la presa del lago Townsend, Carolina del Norte, USA

La química que tiene lugar en el hormigón se puede resumir, de una manera sencilla, en las siguientes etapas<sup>32-36</sup>:

En primer lugar se produce la rotura de los enlaces siloxano en los áridos debido a los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), dando lugar a silicatos alcalinos y ácido silícico:

---

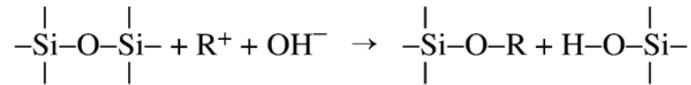
<sup>32</sup> Dent Glasser, L.S., Kataoka, N. "The chemistry of alkali-aggregate reaction". *Cement and Concrete Research*. 11(1981), 1-9.

<sup>33</sup> Glasser, F.P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction, in: R.N. Swamy (Ed.). *The Alkali Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Son Ltd., Glasgow, UK, 1992, pp. 30-53.

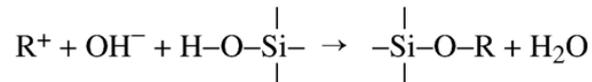
<sup>34</sup> Fournier, B., Bérubé, M.-A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27 (2000) 167-191.

<sup>35</sup> Menéndez, E., Soriano, J. *Procesos expansivos del hormigón: ensayos árido-álcali, ataque por sulfatos, hielo deshielo. Sistemas de prevención y actuaciones*. (CEMCO), (2007).

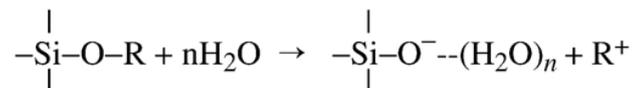
<sup>36</sup> Ichikawa, T., Miura, M. Modified model of alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 1291-1297.



siendo  $\text{R}^+$  los cationes alcalinos  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . El ácido silícico es muy débil y reacciona rápidamente con los iones hidroxilo para generar silicatos alcalinos:



El silicato alcalino resultante es higroscópico (excepto cuando el catión es  $\text{Li}^+$ ) y se expande en el proceso de hidratación,



donde  $n$  refleja el número de hidratación del anión silicato.

Las presiones generadas por la expansión de los geles producto de estas reacciones dan lugar a las roturas registradas en los áridos y la pasta de cemento que los envuelve, lo que redundará en el deterioro del hormigón del que forman parte.

### 1.5.3. Progresos en los conocimientos de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato

Los primeros trabajos acerca de este tipo de comportamientos se deben a T.E. Stanton<sup>37</sup>, quien en 1940 publicó el estudio "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate", investigación de referencia en su campo de aplicación donde se reconocían por primera vez los síntomas de esta problemática en el hormigón.

Desde entonces hasta ahora se han logrado grandes avances en el conocimiento, evaluación y tratamiento de esta patología de los hormigones. Sin embargo, todavía en la actualidad existen muchas cuestiones por aclarar en distintos aspectos sobre los que, a día de hoy, se continúa investigando. Algunos de estos trabajos que se están llevando a cabo se relacionan a continuación.

<sup>37</sup> Stanton, T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 66 (10) (1940) 1781-1811.

El mecanismo de desarrollo de las microrroturas y grietas debido a la presión ejercida por los geles de álcali-sílice y álcali-silicato todavía no está totalmente explicado. Algunos autores analizan este fenómeno como un proceso de difusión de los geles hidratados desde los áridos a los poros y los conductos que los unen, donde reaccionan con  $\text{Ca}^{2+}$ , dando lugar a expansiones de los geles que producen las microrroturas.<sup>38</sup>

Otras teorías señalan que las presiones expansivas debidas a la formación de geles hidratados se acumulan en el interior del árido reactivo hasta que se liberan, dando lugar a la rotura del árido y de la pasta de cemento circundante.<sup>39,40</sup>

Las investigaciones más recientes apuntan a la formación de un “anillo de reacción” que envuelve al árido reactivo y que se forma al reaccionar los silicatos alcalinos, que se generan en la superficie del árido por acción de los hidróxidos alcalinos, con el  $\text{Ca}^{2+}$ , generando un silicato cálcico en la superficie del árido.<sup>36,41</sup> Estos anillos son densos y actúan como una membrana semipermeable, permitiendo el paso de las soluciones alcalinas al interior del árido pero impidiendo la evacuación de los geles álcali-sílice que se generan, de tal manera que la presión acumulada en el interior del árido aumenta hasta que se sobrepasa la resistencia de éste, lo que da lugar a la rotura del árido y de la pasta de cemento circundante.

Otra cuestión que se ha estudiado es de qué manera afecta la composición química y mineralógica de los áridos en el grado de desarrollo de las reacciones álcali-árido en los hormigones. Así, se analiza cuales son las estructuras mineralógicas susceptibles de liberar más sílice capaz de producir esta reacción.

---

<sup>38</sup> Dron, R., Brivot, F. Thermodynamic and kinetic approach to the alkalisilica reaction. Part 2: Experiment. *Cement and Concrete Research*. 22 (1992) 941–948, 23 (1993) 93–103.

<sup>39</sup> Goltermann, P. Mechanical prediction of concrete deterioration—part 2: classification of crack patterns. *Aci Materials Journal*. 92 (1995) 1–6.

<sup>40</sup> Idorn, G.M. A discussion of the paper “Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete” by Zdeněk P. Bažant and Alexander Steffens. *Cement and Concrete Research*. 31 (2001) 1109–1110 (and references therein).

<sup>41</sup> Bleszynski, R.F., Thomas, M.D.A. Microstructural studies of alkali-silica reaction in Fly-ash Concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*. 7 (1998) 766–778.

En este sentido, aparecen teorías que atribuyen la aparición de sílice en disolución a la existencia de defectos de dislocación en los cristales de cuarzo existentes en los áridos reactivos,<sup>42,43</sup> mientras otros autores defienden que es la existencia de microcristales de cuarzo en mayor o menor cantidad lo que propiciará la mayor o menor reactividad del árido.<sup>44,45</sup>

Una tercera corriente aúna las dos anteriores al observar que los áridos que liberan mayor cantidad de sílice son aquellos con alto contenido en microcristales de cuarzo que presentan gran densidad de dislocaciones.<sup>46-49</sup>

Recientes estudios sobre el tema revelan que las distintas formas mineralógicas del cuarzo en los áridos son susceptibles de liberar sílice en disolución y dar lugar a reacciones álcali-sílice, aunque con distintas velocidades de reacción en cada caso.<sup>50</sup>

La presencia de otros elementos químicos afecta también a la concentración de sílice disponible en las disoluciones de los poros de hormigón. Así, se observa que la presencia de aluminio da lugar a una disminución de la concentración de sílice en disolución, por reacción de este con el aluminio para dar aluminosilicatos sólidos no higroscópicos.<sup>51</sup>

Como se puede observar, la liberación de sílice en las disoluciones de los poros de hormigones y morteros es un proceso de difícil explicación.

---

<sup>42</sup> Gogte, B.S. An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions. *Engineering Geology*. 7 (1973) 135–153.

<sup>43</sup> Dolar-Mantuani, L.M.M. Undulatory extinction in quartz used for indentifying potentially alkali-reactive rocks, in: R.E. Oberholster (Ed.), *Proc. of the 5th Int. Conf. on AAR in Concrete*, Cape Town, 1981, pp. 1–12.

<sup>44</sup> Grattan-Bellew, P.E. Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali-silica reaction, in: A.B. Poole (Ed.), *Proc. of the 9th Int. Conf. on AAR in Concrete*, London, vol. 1, 1992, pp. 383–394.

<sup>45</sup> Thomson, M.L., Grattan-Bellew, P.E., Anatomy of a porphyro-blastic schist: alkali-silica reactivity. *Engineering Geology*. 35 (1993) 81–91.

<sup>46</sup> Zhang, X., Blackwell, B.Q., Groves, G.W. The microstructures of reactive aggregates, *British Ceramic Transactions Journal*. 89 (1990) 89–92.

<sup>47</sup> Blackwell, B.Q., Pettifer, K. Alkali-reactivity of greywacke aggregates in Maentwrog Dam (North Wales). *Magazine of Concrete Research*. 44 (161) (1992) 255–264.

<sup>48</sup> Kerrick, D.M., Hooton, R.D. ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: Results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests. *Cement and Concrete Research*. 22 (1992) 949–960.

<sup>49</sup> Shayan, A. Alkali reactivity of deformed granitic rocks: a case study. *Cement and Concrete Research*. 23 (1993) 1229–1236.

<sup>50</sup> Velasco-Torres, A., Alaejos, P., Soriano, J. Comparative study of the alkali-silica reaction (ASR) in granitic aggregates, *Estudios Geológicos-Madrid*. 66 (1) (2010) 105–114.

<sup>51</sup> Hüniger, Klaus-Jürgen. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 1193–1205.

También se investiga sobre la capacidad de los áridos para aportar a las disoluciones de los poros del hormigón el otro ingrediente fundamental en la reactividad álcali-árido, los iones alcalinos, cuyo aporte se debe, principalmente, a los cementos. A este respecto existen opiniones dispares e incluso encontradas.

Por una parte, hay investigadores que defienden que los minerales ricos en álcalis, específicamente los feldspatos, liberan cationes alcalinos en cantidades a tener en cuenta para la reactividad del hormigón,<sup>52,53</sup> y por otra, hay autores que concluyen que la descomposición de los feldspatos en la disolución de los poros del hormigón es muy pequeña y no aporta cantidades de iones alcalinos a tener en cuenta para la reactividad, excepto cuando se utilizan cementos con contenidos de álcalis muy bajos.<sup>54</sup>

En esta última afirmación coinciden ambas corrientes de pensamiento y es de gran importancia, ya que una de las posibles soluciones al problema de esta reactividad en los hormigones podría ser limitar la cantidad de iones alcalinos existentes en las disoluciones de los poros del hormigón mediante el uso de cementos de bajo contenido en álcalis, con lo que es en estas condiciones en las que la liberación de álcalis por parte de los áridos sería de mayor trascendencia.

#### 1.5.4. Posibles soluciones a la reactividad de los áridos

A medida que ha ido aumentando el conocimiento de los procesos que se dan en este tipo de reacciones, se han estudiado diferentes formas de evitar que se produzcan o, cuando menos, minimizar en lo posible los efectos dañinos que provocan en los hormigones y morteros.

Las primeras pruebas con resultados prometedores se han llevado a cabo con diferentes adiciones que se utilizan en la industria de los cementos compuestos.

---

<sup>52</sup> Constantiner, D., Diamond, S. Alkali release from feldspars into pore solutions. *Cement and Concrete Research*. 33(4) (2003): 549–554.

<sup>53</sup> Bérube, MA., Duchesne, J., Dorion, JF., Rivest, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*. 32(8) (2002): 1215-1227.

<sup>54</sup> Wang, Y., Deng, M., Tang, M. Alkali release from aggregate and the effect on AAR expansion. *Materials and Structures*. 41 (1) (2008): 159-171.

Diversos autores llegan a la conclusión de que, tanto los materiales con propiedades puzolánicas como el humo de sílice, las cenizas volantes o el metacaolín, como las escorias de alto horno, son capaces de actuar reduciendo o, incluso, evitando la reactividad árido-álcali.<sup>55-61</sup>

Recientes investigaciones realizadas en la Universidad de Burgos por A. Martín *et al.*<sup>62</sup> estudian las posibilidades del ladrillo cerámico molido como adición puzolánica capaz de evitar la reactividad de los áridos silíceos. Los resultados obtenidos hasta el momento resultan prometedores.

Los posibles mecanismos de actuación de estas cargas minerales que están en consideración son, por un lado la eliminación de  $\text{Ca(OH)}_2$ , que pasa a formar parte de los aluminosilicatos cálcicos generados por reacción de las puzolanas o por la hidraulicidad asociada a las escorias, y por otro lado la reducción de los álcalis y del pH en las disoluciones de poro de hormigones y morteros, debida a la formación de estos aluminosilicatos

Los resultados obtenidos de estas investigaciones refuerzan en muchos casos la teoría del “anillo de reacción”, expuesta anteriormente, ya que, aunque la adición de estas cargas minerales no evita que los álcalis presentes en las soluciones de poro reaccionen con la sílice disponible para formar geles, estos pueden difundir por los poros del hormigón ya que no encuentran las barreras que suponen los “anillos de reacción”.

---

<sup>55</sup> Lumley, J.S. The ASR expansion of concrete prisms made from cements partially replaced by ground granulated blastfurnace slag, Consultant to Blue Circle Industries PLC, Technical Centre, 305 London Road, Greenhithe, Kent, DA9 9JQ, UK. (1992).

<sup>56</sup> Bleszynski, R.F., Thomas, M.D.A. Microstructural studies of alkali-silica reaction in Fly-ash Concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*. 7 (1998) 766–778.

<sup>57</sup> Shehata, M.H., Thomas, M.D.A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. 30 (2000) 1063–1072.

<sup>58</sup> Shehata, M.H., Thomas, M.D.A. Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*. 32 (2002) 341–349.

<sup>59</sup> Bektaş, F., Turanlı, L., Topal, T., Goncuoglu, M. Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate calcium fly-ash. *Cement and Concrete Research*. 34 (2004) 2209–2214.

<sup>60</sup> Hester, D., McNally, C., Richardson, M. A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*. 19 (2005) 661–665.

<sup>61</sup> García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A. Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 175–183.

<sup>62</sup> Martín de la Fuente, A. Determinación experimental de la reactividad química de áridos silicatados en matrices cementicias. Suficiencia investigadora. Universidad de Burgos, 2008.

Otras sustituciones parciales del cemento con las que se están obteniendo resultados prometedores son las que introducen polvo de los propios áridos reactivos empleados para la fabricación de esos hormigones en los que aparece reacción álcali-árido.

La inclusión de estas partículas reactivas de diámetro muy pequeño (finura Blaine incluso mayor a la del cemento) favorecería la retirada de álcalis por efecto puzolánico. Además, los geles álcali-sílice se formarían en tantos puntos y tan difundidos que el efecto total de la reacción se volvería inapreciable.<sup>63-67</sup>

Otra forma de tratar el problema, con la que se han obtenido resultados positivos, es mediante la adición de compuestos de litio (LiOH, LiNO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, etc.) a las mezclas en proporciones tales que se alcance una relación mínima de concentraciones Li<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>. Estos procedimientos se estudian desde hace tiempo<sup>68</sup> y ya se emplean para el tratamiento de estas reactividades, sin embargo aun hoy se estudian los mecanismos de estas reacciones para su mayor conocimiento y la apropiada dosificación de los compuestos de litio utilizados para la inhibición de la reactividad.

En una revisión crítica realizada por Feng *et al.* se encuentra una descripción detallada de los mecanismos de reacción que los diferentes investigadores proponen para explicar cómo actúa el litio para disminuir la reactividad álcali-árido<sup>69</sup>.

---

<sup>63</sup> Carles-Gibergues, A., Cyr, M., Moisson, M., Ringot, E. A simple way to mitigate alkali-silica reaction. *Materials and Structures*. 4 (2008):73–83.

<sup>64</sup> Cyr, M., Rivard, P., Labrecque, F. Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 31 (7) (2009): 438-446.

<sup>65</sup> Cyr, M., Carles-Gibergues, A., Moisson, M., Ringot, E. Mechanism of ASR reduction by reactive aggregate powders. *Advances in Cement Research*. 21 (4) (2009) 147-158.

<sup>66</sup> Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*. 24 (7) (2010) 1309-1312.

<sup>67</sup> Wu, D. Y., Fang, K.H., Liu, Y.H. Suppressing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction by Using Limestone Powder. *Advances in Building Materials, Pts 1-3*, Stafa-Zurich, Trans Tech Publications Ltd. 168-170 (2011): 40-43.

<sup>68</sup> McCoy, E. J., Caldwell, A.G. New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. *J. Am. Concr. Inst.* 22, (1951) p. 693.

<sup>69</sup> Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Balcom, B. J., Folliard, K. J. Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. *Cement and Concrete Research*. 35 (9) (2005): 1789-1796.

El mecanismo más ampliamente aceptado es la formación de cierto tipo de silicatos de litio, insolubles y no higroscópicos, en la superficie de los áridos, de manera que éstos quedan protegidos de futuros ataques de los álcalis que permanecen en la disolución. Estos silicatos de litio-álcalis (y posiblemente calcio) deben contener una concentración mínima de litio para no ser expansivos, de ahí que se necesite una relación mínima  $\text{Li}^+ / \text{Na}^+$  equivalente para que el tratamiento sea efectivo.<sup>70-77</sup>

Otros investigadores sugieren que el litio es responsable de la disminución de la velocidad de disolución de la sílice de tal manera que disminuye el potencial de expansión de ésta.<sup>78-79</sup>

Aunque un gran número de compuestos de litio han dado resultados positivos frente a la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato, diversos estudios indican que el nitrato de litio,  $\text{LiNO}_3$ , parece ser el más prometedor debido, en gran medida, a que no aumenta el pH de la disolución de poro.<sup>80</sup>

Por último cabe mencionar, acerca de los métodos de inhibición de la expansión debida a estas reactividades, los trabajos realizados con zeolitas modificadas.

---

<sup>70</sup> Lawrence, M., Vivian, H. H. The reactions of various alkalis with silica. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 12, (1961) p. 96.

<sup>71</sup> Stark, D. C. Lithium salt admixtures—an alternative method to prevent expansive alkali-silica reactivity. Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Concrete Society of U.K, London (1992), p. 1017.

<sup>72</sup> Diamond, S., Ong, S. The mechanisms of lithium effects on ASR. Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Concrete Society of U.K., (London) (1992), p. 269.

<sup>73</sup> Mo, X., Yu, C., Xu, Z. Long-term effectiveness and mechanism of LiOH in inhibiting ASR. Cement and Concrete Research., 33 (2003): 115-119.

<sup>74</sup> Kawamura, M., Fuwa, H. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. Cement and Concrete Research. 33 (2003): 913-919.

<sup>75</sup> Mitchell, L. D., Beaudoin, J. J., Grattan-Bellew, P. The effects of lithium hydroxide solution on alkali silica reaction gels created with opal. Cement and Concrete Research. 34 (4) (2004): 641-649.

<sup>76</sup> Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Folliard, K. J., Fournier, B. Summary of research on the effect of  $\text{LiNO}_3$  on alkali silica reaction in new concrete. Cement and Concrete Research. 40 (4) (2010): 636-642.

<sup>77</sup> Tremblay, C., Bérubé, M. A., Fournier, B., Thomas, M. D. A., Folliard, K. J. Experimental investigation of the mechanisms by which  $\text{LiNO}_3$  is effective against ASR. Cement and Concrete Research. 40 (4) (2010): 583-597.

<sup>78</sup> Collins, C., Ideker, J., Willis, G., Kurtis, K. Examination of the effects of LiOH, LiCl, and  $\text{LiNO}_3$  on ASR. Cement and Concrete Research. 34 (2004): 1403-1415.

<sup>79</sup> Kurtis, K., Monteiro, P. Chemical additives to control expansion of ASR gel: proposed mechanisms of control. Journal of Materials Science. 38 (2003) 2027.

<sup>80</sup> Diamond, S. Unique response of  $\text{LiNO}_3$  as an alkali silica reaction preventive admixture. Cement and Concrete Research. 29 (1999) 1271.

Estas adiciones minerales son aluminosilicatos porosos modificados adecuadamente de manera que, al encontrarse en disolución en presencia de cationes alcalinos, son capaces de incorporar dichos cationes a sus estructuras eliminándolos de las disoluciones, evitándose así la formación de geles expansivos.

Debido a la eficacia del intercambio iónico que se da en estas zeolitas, con una pequeña sustitución en el cemento (5%) se obtienen disminuciones en las expansiones del hormigón equiparables a las conseguidas con altas sustituciones de cenizas volantes (25%) o escorias (40%), con mínima influencia sobre la resistencia y trabajabilidad de los hormigones tratados.<sup>81</sup>

El uso de zeolitas naturales como adiciones en los cementos puede disminuir de manera muy efectiva la reactividad de los áridos susceptibles de producirla y además contribuye a las resistencias del cemento por su comportamiento puzolánico.<sup>82,83</sup>

---

<sup>81</sup> Quanlina, N., Naiqian, F. Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 1784–1788.

<sup>82</sup> Ahmadi, B., Shekarchi, M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*. 32 (2) (2010): 134-141.

<sup>83</sup> Karakurt, C., Topcu, I. B. Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. *Construction and Building Materials*. 25 (4) (2011): 1789-1795.

## **Capítulo 2: Objetivos**

---



## 2.1. Objetivos

Como objetivo general de esta Tesis Doctoral se pretende el estudio de la viabilidad para la fabricación de morteros premezclados en seco utilizando como áridos únicamente residuos de la industria extractiva de la pizarra.

Dentro de este objetivo general se incluyen los siguientes hitos concretos que se pretenden alcanzar:

- Se tratará la problemática que presentan las pizarras en su uso como áridos y las posibilidades que existen para adecuar estos materiales de manera que se consigan morteros de calidad.

- Se establecerán dosificaciones de morteros premezclados de albañilería y de revoco y enlucido con sus caracterizaciones completas en las que se puede comprobar que las cualidades de los productos diseñados están en valores del mismo orden que los morteros disponibles en el mercado.

- Se analizarán en detalle las reactividades árido-álcali que este tipo de residuos de pizarra produce sobre los morteros, intentando minimizar esta reacción mediante diversos procedimientos.

- Se realizará, finalmente, un estudio económico sobre el coste de fabricación de los morteros diseñados teniendo en cuenta los procesos que se deben realizar, desde la transformación inicial de los residuos de pizarra hasta la presentación final de los morteros.

La viabilidad económica en la producción unida a la calidad técnica de los productos son los dos parámetros que convertirían a los morteros fabricados en realmente competitivos con los que actualmente se encuentran a la venta. Esto posibilitaría que la valorización de los residuos de pizarra mediante la fabricación de morteros se pudiera convertir en una realidad.



## **Capítulo 3: Experimental**

---



### 3.1. Introducción

En este capítulo se describen los ensayos y procesos que se han llevado a cabo para las caracterizaciones de las materias primas y morteros que se detallan en esta Tesis Doctoral. Se explican, de una manera pormenorizada, las diferentes técnicas instrumentales realizadas y los equipos utilizados para ello.

Los ensayos se agrupan en ensayos físicos, químicos, de durabilidad y de reactividad. Este último grupo se trata de forma independiente debido a la importancia de estos análisis en el presente trabajo. En un último apartado se incluyen las técnicas instrumentales que se emplean en distintos momentos para obtener información complementaria de gran valor para la comprensión del comportamiento de los materiales estudiados.

### 3.2. Ensayos físicos

#### 3.2.1. Preparación de los áridos

Los áridos utilizados en los morteros diseñados en este trabajo se obtienen a partir de paralelepípedos de pizarra más o menos grandes, denominados “tochos” (Figura 3.1), o de restos del cortado de éstos a partir de los bloques de grandes dimensiones o “rachones”.



Figura 3.1. Restos de tochos de pizarra en la escombrera

La preparación del árido para la realización de los morteros comprende los siguientes procesos:

- En primer lugar las piezas de pizarra se rompen en trozos más pequeños y éstos son machacados en una machacadora de mandíbulas de la casa Proeti S.A. como la de la Figura 3.2, hasta tamaños menores de 4 mm.



Figura 3.2. Machacadora de mandíbulas

- Se procede al tamizado de lo machacado para separar los diferentes tamaños de grano que se utilizarán para recomponer una arena con una granulometría específica y establecida. Los tamices utilizados son los de luz de malla 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 y 0.063 mm. (Figura 3.3).

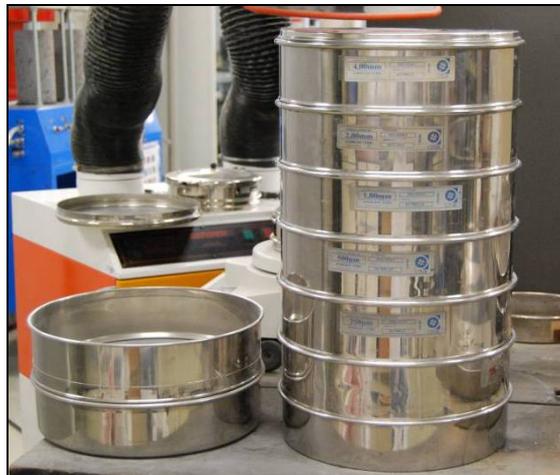


Figura 3.3. Batería de tamices para la separación de los diferentes tamaños de grano

- Cada una de las fracciones separadas se lava con agua corriente, de manera que se eliminan los finos adheridos a los granos de mayor tamaño.
- Las diferentes fracciones se secan en estufa a 70 °C hasta peso constante (Figura 3.4) y se mantienen en sacos de polietileno preparadas para su uso.



Figura 3.4. Fracciones granulométricas después del secado

### 3.2.2. Densidad y absorción de agua del árido

Para la medida de estas propiedades se toma como referencia la norma UNE-EN 1097-6: 2001, "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua"<sup>84</sup>. Concretamente se sigue el método del picnómetro para partículas de áridos comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm, explicado en el punto 9 de dicha norma. El procedimiento operatorio es el siguiente:

- Se prepara 1 kg del árido pesando las distintas cantidades de cada una de las fracciones granulométricas comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm, de acuerdo con la curva granulométrica establecida.
- Se introduce el árido en agua y se mantiene durante 24 horas para asegurar su total saturación.

Se elimina el agua, se extiende el material en una capa uniforme sobre la bandeja y se remueve con una espátula cada cierto tiempo para evaporar la humedad de la superficie de las partículas de una forma uniforme. Se pretende alcanzar el estado de superficie seca de las partículas del árido.

- Se comprueba si se consigue el estado de superficie seca de las partículas utilizando un molde troncocónico normalizado, como el de la Figura 3.5, que se rellena con el árido. Se apelmaza ligeramente el material en el interior del molde dejando caer 25 veces el pisón, también de medidas y peso establecidos, a través del orificio de la parte superior del molde. Se eleva el molde verticalmente y se observa la forma que adopta el árido. Se considera que está en el estado adecuado, saturado pero con la superficie seca, cuando adopta la forma de un cono con las pendientes regulares (Figura 3.5). Si no se desmorona el árido o se consigue un cono con varias pendientes se debe continuar con el secado.

<sup>84</sup> UNE-EN 1097-6: 2001, Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua, Asociación Española de Normalización y Certificación (2001).



Figura 3.5. Equipo para la comprobación de la humedad del árido y cono formado por árido en estado saturado con superficie seca

- Se pesa el picnómetro vacío. Se introducen las partículas, en estado saturado con superficie seca, en el interior del picnómetro y se pesa el conjunto. Se calcula la cantidad de árido introducido en el picnómetro por diferencia ( $M_1$ ).
- Se rellena el picnómetro con agua y se eliminan las burbujas de aire atrapadas girando y golpeando ligeramente el picnómetro con la mano en su base. Esta operación se realiza varias veces. Posteriormente el picnómetro se sumerge en baño a 22 °C hasta el día siguiente.
- Una vez eliminadas las burbujas se coloca la tapa del picnómetro que contiene el vástago con la marca de enrase y se rellena con agua hasta dicha marca, teniendo la precaución de que no quedan burbujas en el recipiente.
- Se seca el exterior del picnómetro y se pesa ( $M_2$ ).



Figura 3.6. Pesado del picnómetro lleno con árido y agua hasta enrase

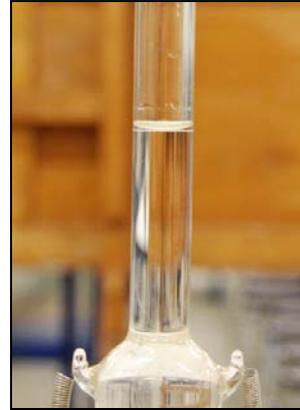


Figura 3.7. Detalle del enrase del picnómetro



Figura 3.8. Pesado del árido seco

- Se vacía el picnómetro en una bandeja tarada y se lava con agua, de tal manera que todo el árido que estaba en el picnómetro se encuentra ahora en la bandeja.
- Se seca el árido en una estufa ventilada hasta peso constante y se calcula por diferencia el peso de árido seco ( $M_4$ ).
- Se llena el picnómetro con agua hasta la marca de enrase, se seca exteriormente y se pesa ( $M_3$ ).

Se calcula la densidad de las partículas tras secado en estufa, en megagramos por metro cúbico, con la siguiente fórmula:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Para calcular la absorción de agua como porcentaje de la masa seca se aplica la siguiente fórmula:

$$WA = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

### 3.2.3. Friabilidad de las arenas

Con este ensayo se calcula la resistencia a la fragmentación de las arenas. La norma que se toma como referencia para ello es la UNE 83-115-89<sup>85</sup> y el método seguido consta de las siguientes operaciones:

- Una muestra de 2 kg de la arena a ensayar se tamiza por vía húmeda a través de los tamices 0,1 y 2 mm.
- Se seca la muestra tamizada y retenida entre los tamices 0,1 y 2 mm.
- Por cuarteo se extrae la muestra a ensayar, que será de  $500 \pm 2$  g.
- Se introduce el árido en el cilindro de ensayo.
- Se introduce en el cilindro de ensayo la carga de bolas de acero estipulada en la norma (Figura 3.9) y se añaden 2,5 L de agua.



Figura 3.9. Árido y carga de bolas en los cilindros de ensayo

- Se cierra el cilindro de ensayo con la tapadera y se coloca en el equipo Micro-Deval. El equipo, incluido en la imagen de la Figura 3.10, está programado girar el cilindro 1500 vueltas a una velocidad de  $100 \pm 5$  r.p.m.

---

<sup>85</sup> UNE 83-115-89, Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas, Asociación Española de Normalización y Certificación (1989).



Figura 3.10. Aparato Micro-Deval y tamices utilizados en el ensayo de friabilidad

- Pasados los ciclos se procede a descargar, en varias etapas, el material y la carga abrasiva sobre tres tamices superpuestos de 8 mm (para recoger la carga abrasiva), 0,2 mm (para proteger el tamiz de 0,05 mm) y un tamiz de 0,05 mm.
- Se lava el conjunto bajo un chorro de agua hasta que ésta salga clara. Se retira el tamiz de 8 mm.
- Se secan los tamices de 0,2 mm y 0,05 mm, hasta peso constante.
- Se tamizan en seco conjuntamente los rechazos de ambos tamices.
- Se pesa, con precisión de un gramo, el conjunto de los rechazos sobre los dos tamices sobre una bandeja previamente tarada,  $M_1$ .

El ensayo se realiza por duplicado y el coeficiente de friabilidad, redondeado a la unidad, se calcula:

$$F.A. = 100 \times \frac{500 - M_1}{500}$$

#### 3.2.4. Amasado de los morteros

Para el amasado de los morteros se atiende a lo explicado en el punto 6 de la norma UNE-EN 1015-2: 1999<sup>86</sup>.

El amasado se lleva a cabo con una amasadora planetaria de la casa Proeti (Figuras 3.11 y 3.12).

Debido a la granulometría y forma de los áridos utilizados en la presente investigación, la introducción del árido en el recipiente de amasado a través del cono superior y el conducto interno de la amasadora no resulta sencilla ni operativa por lo que se opta por unir el agua y los componentes sólidos del mortero en el recipiente de amasado e introducir éste en la amasadora con la mezcla dentro.

El tiempo de amasado es, por regla general, de 90 segundos.



Figura 3.12. Detalle del recipiente y la pala de la amasadora

Figura 3.11. Amasadora planetaria

### 3.2.5. Consistencia de los morteros

El método utilizado para determinar la consistencia de los morteros ha sido el de la mesa de sacudidas que se describe en la norma UNE-EN 1015-3: 2000<sup>87</sup> y que se puede resumir en los siguientes pasos:

- En primer lugar se limpian y humedecen con un paño húmedo la mesa de sacudidas, el molde troncocónico y su collarín para el llenado y el pisón de nylon. Este es el equipo necesario para la realización del ensayo. En este caso se utiliza una mesa de sacudidas automática de la marca Proeti (Figura 3.13).

<sup>86</sup> UNE-EN 1015-2: 1993, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo, Asociación Española de Normalización y Certificación (1993).

<sup>87</sup> UNE-EN 1015-3: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas), Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

- Se coloca el molde troncocónico en el centro del disco de la mesa de sacudidas y se introduce el mortero en dos capas. Cada capa se compacta con diez golpes del pisón con el objeto de conseguir un llenado uniforme del molde. La segunda capa debe quedar por encima del molde, ocupando la zona del collarín de llenado, para asegurar que el molde queda completamente lleno después del golpeo con el pisón.



Figura 3.13. Equipo para el ensayo de consistencia

- Se quita el collarín de llenado y se elimina el exceso de mortero enrasando con una espátula. De ser necesario, se limpia la superficie libre del disco de mortero o agua que pueda haberla ensuciado.
- A los 15 segundos aproximadamente se levanta lenta y verticalmente el molde troncocónico y se pone en marcha la mesa de sacudidas. El plato se levanta un centímetro y cae libremente. Este golpeo se repite 15 veces con una frecuencia de, aproximadamente, una sacudida por segundo.
- El mortero se escurre hacia el exterior del plato a medida que es sacudido, formando una superficie circular. Se mide el diámetro de esa superficie circular en dos direcciones perpendiculares entre sí mediante un calibre. Se anotan los resultados en milímetros con una exactitud de 1 mm. Se calcula el valor del escurrimiento como el valor medio de las dos medidas. En la Figura 3.14 se ilustra la medición.

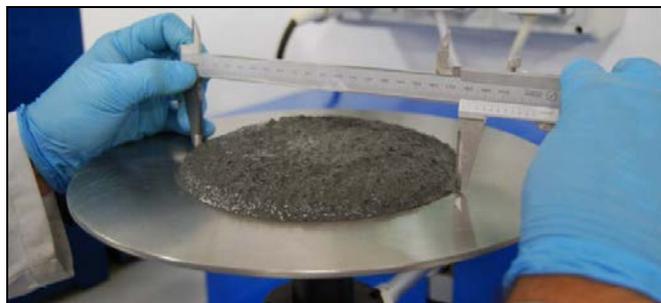


Figura 3.14. Medición del escurrimiento en la mesa de sacudidas

### 3.2.6. Densidad aparente del mortero fresco

Esta propiedad se calcula tomando como referencia la norma UNE-EN 1015-6<sup>88</sup> y el fundamento del ensayo es dividir la masa de mortero por el volumen que ocupa cuando se introduce, con una compactación específica, en un recipiente de medida de capacidad conocida.

El procedimiento operativo es el siguiente:

- Se amasa el mortero según lo indicado en el punto 3.1.4.
- Se llena el recipiente de medida, de 1 litro de volumen ( $V_v$ ) y masa ( $m_1$ ) previamente verificada, hasta, aproximadamente, la mitad de su altura. Para compactar el mortero, se bascula el recipiente de un lado a otro, desde una altura de aproximadamente 30 mm y se deja caer 10 veces sobre una superficie rígida de hormigón distribuyendo las zonas de basculado en todo el cilindro del recipiente.
- Se rellena el recipiente con mortero hasta que haya un pequeño exceso y se compacta de la misma manera que anteriormente. Se elimina el exceso de mortero mediante enrase con regla, de manera que se obtiene una superficie plana y nivelada con el borde superior del recipiente.
- Se limpia exteriormente el recipiente, si se hubiese ensuciado, y el borde de éste. Se determina la masa total, ( $m_2$ ) del recipiente lleno con el mortero, con una exactitud de 1g (Figura 3.15).

---

<sup>88</sup> UNE-EN 1015-6: 1999, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).



Figura 3.15. Determinación de la masa de recipiente de 1 L lleno de mortero hasta enrase

El cálculo de la densidad ( $\rho_m$ ) del mortero fresco se realiza aplicando la fórmula:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v}$$

### 3.2.7. Contenido en aire en el mortero fresco

El contenido en aire en el mortero se evalúa mediante el método de presión explicado en el punto 7 de la norma UNE-EN 1015-7<sup>89</sup>. Para ello se emplea un recipiente que encaja perfectamente con una tapa que contiene un sistema de válvulas de entrada y salida de aire y de agua, una bomba manual para introducir aire al sistema y un manómetro regulado de tal forma que expresa de forma directa el contenido de aire introducido en la masa de mortero en %. Del centro de la tapa sale hacia abajo un tubo que se introduce en el mortero y que va a permitir la introducción del aire en él. En la Figura 3.16 se incluye una imagen del recipiente y la tapa ensamblados.

Las operaciones que se llevan a cabo para la medida del contenido de aire son las siguientes:

- Una vez amasado el mortero se procede al llenado del recipiente. Esta operación se realiza en cuatro capas iguales, compactadas cada una de ellas con 10 golpes de pisón (como el utilizado en el apartado 3.1.5) distribuidos de manera que se obtenga una superficie del mortero plana.

<sup>89</sup> UNE-EN 1015-7: 1999, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

- Se elimina el exceso de mortero, con una regla para enrasar, de manera que se obtiene una superficie de mortero plana y nivelada con el borde superior del recipiente, como la de la imagen incluida en la Figura 3.15.
- Se limpia bien el borde del recipiente y sobre él se encaja verticalmente la tapa y se fija con firmeza (disposición de la Figura 3.16).

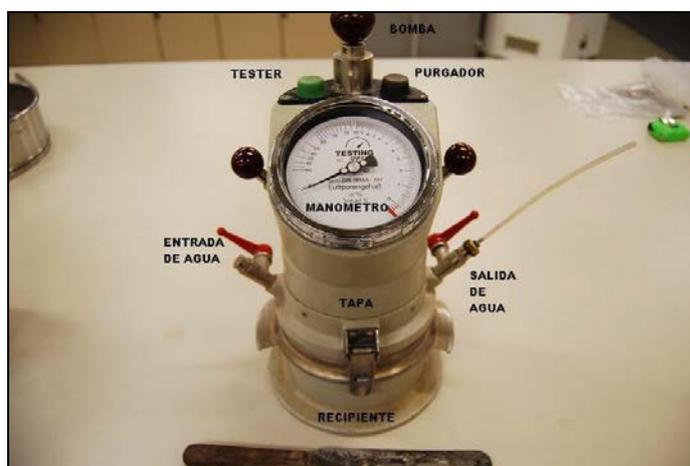


Figura 3.16. Equipo para la medida del contenido de aire en el mortero fresco

- Se llena de agua la cavidad que queda entre la tapa y el mortero del recipiente. Para ello se introduce agua por la válvula de entrada hasta que se observa que sale por la válvula de salida de agua. En este punto se accionan las dos llaves rojas que cierran ambas válvulas.
- Mediante la bomba, se llena la cavidad interna de la tapa hasta que el manómetro se sitúe en el cero. Si se bombea exceso de aire se puede corregir accionando el botón purgador hasta estabilizar en el cero.
- Se acciona el botón verde, tester. En ese momento se ponen en contacto la cavidad interna de la tapa, con una presión de aire específica, con el mortero mediante el tubo que sale hacia abajo en el centro de la tapa. Se mantiene el tester apretado hasta que las presiones de ambas cámaras se igualan y la aguja del manómetro deja de moverse.
- Se toma como valor del contenido de aire del mortero al obtenido por lectura directa del equipo, en %. A medida que dicho valor aumenta la precisión del dato disminuye en el manómetro como se aprecia en la Figura 3.17.



Figura 3.17. Lectura directa del contenido en aire en el manómetro

### 3.2.8. Retención de agua en el mortero fresco

En este ensayo se determina la cantidad de agua retenida en el mortero después de un tratamiento de succión normalizado. La norma en la cual se especifica el método de ensayo es la UNE 83-816-93<sup>90</sup>.

Para la realización del ensayo se requiere un molde rígido, de diámetro y altura normalizados, dos bases no absorbentes, como un vidrio o una placa de plástico, una pesa con una masa de 2 kg, dos piezas cuadradas de gasa de algodón y ocho discos de papel de diámetro y gramaje también normalizados, además de material de uso corriente en laboratorio, como balanza o espátula. El equipo necesario se incluye en la fotografía de la Figura 3.18.

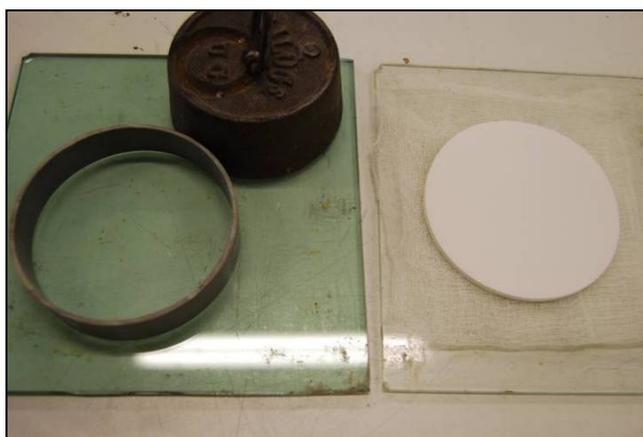


Figura 3.18. Equipo específico para el ensayo de retención de agua

<sup>90</sup> UNE 83-816-93, Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua, Asociación Española de Normalización y Certificación (1993).

El procedimiento es el siguiente:

- En primer lugar se procede al amasado del mortero a ensayar, según lo especificado en el apartado 3.1.4. Se deja reposar el material durante 10 minutos.
- Se pesa el molde seco y la base de vidrio y se anota su peso. Se pesan también los ocho discos de papel de filtro y las dos piezas de gasa de algodón, todos juntos. Se anota su peso con una aproximación de 0,1 g.
- Se llena el molde con unas 10 tomas realizadas con la punta de la espátula de manera que el mortero sobresalga ligeramente del molde en las últimas adiciones con la espátula. Se enrasa la superficie del mortero con movimientos de vaivén de la espátula, manteniéndola a unos 45° de la superficie de éste.
- Se limpia la base de vidrio de mortero que hubiese podido caer fuera del molde y se pesa el conjunto vidrio, molde y mortero.
- Se cubre la superficie del mortero con las gasas de algodón y se colocan los ocho discos de papel sobre las gasas. Se coloca otra placa de vidrio sobre los discos y se le da la vuelta al conjunto, quedando ahora los discos debajo de las gasas y encima de éstas el mortero en el molde.
- Se carga el mortero con la pesa de 2 kg durante 5 minutos (Figura 3.19). Pasado este tiempo se retira la pesa y el molde con el mortero y se recuperan las gasas y los discos que se pesan inmediatamente, como se ilustra en la imagen de la Figura 3.20.



Figura 3.19. Conjunto pesa, molde con el mortero, gasas, discos y base de vidrio



Figura 3.20. Pesado de las gasas y los discos después de la carga con la pesa de 2 kg

Para el cálculo del agua retenida en el mortero se necesita conocer el agua que hay en el mortero que se introduce en el molde, ( $m_1$ ), y el agua que retiran los discos y las gasas, ( $m_2$ ). Este último dato se conoce por diferencia de pesadas de los discos y gasas antes y después de ponerlas en contacto con el mortero.

Para calcular la cantidad de agua que hay en el mortero introducido en el molde primero se debe saber qué cantidad de este se ha introducido en aquel. Se calcula por diferencia de pesadas del molde y vidrio sin y con mortero. El porcentaje de agua que tiene el mortero es conocido ya que se parte de una dosificación en la que se especifican las cantidades de todos los constituyentes del mortero.

Se obtiene la cantidad de agua retenida en la muestra de mortero después de la succión con la siguiente operación:

$$A = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

### 3.2.9. Período de trabajabilidad del mortero fresco

El período de trabajabilidad se define como el tiempo que tarda un mortero en alcanzar un límite definido de resistencia a la penetración de una sonda normalizada. Para establecer este período se toma como referencia el método explicado en el capítulo 6 de la norma UNE-EN 1015-9<sup>91</sup>.

Los aparatos necesarios para la realización del ensayo son:

- Moldes cilíndricos de diámetro 75 mm o mayor, rígidos y abiertos por su parte superior, con una altura de entre 50 y 100 mm.
- Una sonda para penetración compuesta por una varilla cilíndrica de latón con dos diámetros distintos. Desde el extremo hasta los 25 mm tiene un diámetro de 6,175 mm, mientras que el resto, hasta 65 mm de longitud, tiene un diámetro de 5 mm. El extremo de la sonda es plano y perpendicular al eje de la misma. En la zona de cambio de diámetro de la sonda reposa una arandela de latón de, aproximadamente, 20 mm de diámetro exterior.
- La sonda se mantiene en un dispositivo como el de una taladradora vertical de palanca, que permite el descenso vertical de un modo controlado y estable.

---

<sup>91</sup> UNE-EN 1015-9: 2000, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

- Una balanza, preferentemente con sistema de tara, de al menos 15 kg de capacidad y gradaciones menores o iguales a 100 g.
- Material de uso corriente en laboratorio como vasos, regla, paleta...

El procedimiento operatorio es el siguiente:

- Una vez amasado el mortero se llena el molde en 10 etapas hasta conseguir un ligero exceso de material en él. En cada etapa, después de la adición de mortero, el molde se golpea cuatro veces sobre la mesa de trabajo. Cuando el molde está lleno se enrasa con una regla, de tal modo que el mortero quede nivelado con la parte superior del molde.
- El molde lleno se conserva en la cámara húmeda, a temperatura de  $20\pm 2$  °C y a una humedad relativa de al menos el 95%.
- Pasado un tiempo prudencial (según el tipo de mortero ensayado) el molde se coloca sobre la balanza, debajo de la sonda de penetración, de tal modo que la zona en la que la sonda va a penetrar se encuentre a una distancia de al menos 20 mm del borde del molde (o de otro ensayo previo, si lo hubiera) (Figura 3.21). Se tara la balanza y, con ayuda de la palanca de la taladradora, la sonda de penetración se baja lentamente y se introduce en la muestra hasta que la arandela roza la superficie de ésta, como se puede apreciar en la Figura 3.22.
- El valor indicado en la balanza, en kilogramos, se anota, así como el tiempo transcurrido desde el inicio del amasado hasta el momento de la penetración de la sonda.
- Las penetraciones con la sonda en el mortero se repiten cada cierto tiempo, cada vez en intervalos menores, hasta que, en una de ellas, la resistencia que ofrece el mortero a la penetración de la sonda hasta la arandela es superior a  $0,5 \text{ N/mm}^2$ . Teniendo en cuenta el diámetro de la sonda esta resistencia se corresponde con una carga de 1,5 kg sobre el mortero.

El período de trabajabilidad, determinado como el tiempo desde que se mezclan los componentes sólidos del mortero con el agua de amasado hasta que el mortero ofrece una resistencia a la penetración de la sonda de  $0,5 \text{ N/mm}^2$ , se calcula por interpolación de los tiempos obtenidos para la resistencia inmediatamente inferior y superior, redondeando al minuto.

El ensayo se hace por duplicado y se calcula el valor medio de los dos resultados, redondeando al minuto.



Figura 3.21. Conjunto balanza-sonda en el dispositivo de la taladradora y molde con mortero, preparado para ensayo de trabajabilidad



Figura 3.22. Penetración de la sonda en el mortero con lectura de carga en la balanza

### 3.2.10. Fluidez del mortero fresco mediante el maniabilímetro

Con este ensayo se pretende estudiar la fluidez del mortero fresco.

El fundamento del mismo es la medida del tiempo empleado por una mezcla para fluir, a través de un espacio establecido, hasta alcanzar una marca concreta. Para su realización se toma como referencia la norma francesa NF P 18-452<sup>92</sup>.

El equipo utilizado para la realización del ensayo es un maniabilímetro de la casa Ibertest, modelo IB32-115E, que consta de un molde prismático metálico que se apoya sobre una placa base mediante cuatro amortiguadores de goma.

Este molde está dividido en dos huecos de volumen diferente mediante un tabique móvil que se puede deslizar verticalmente. Este tabique tiene sección triangular, de manera que forma una pared vertical en uno de los huecos en que divide el molde y una pared diagonal en el otro. Anclado al molde se encuentra un vibrador eléctrico capaz de producir una vibración de 50 Hz de frecuencia.

<sup>92</sup> NF P 18-452, mai 1988 : Bétons – Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres.

Para sincronizar la vibración con la toma de tiempos el aparato incluye un equipo electromecánico que posibilita la puesta en marcha del vibrador en el momento en el que se retira el tabique móvil.



Figura 3.23. Maniabilímetro y barra de picado para la determinación de la fluidez del mortero fresco

Para la introducción del mortero en el molde se utiliza una barra de picado cilíndrica de 6 mm de diámetro y con un peso determinado.

En la imagen de la Figura 3.23 se incluye el equipo descrito.

La realización del ensayo consta de las siguientes etapas:

- En primer lugar se amasa el mortero con la cantidad de agua establecida.
- Se llena el hueco mayor del maniabilímetro, que tiene sección de trapecio rectangular, en cuatro capas más o menos iguales. Cada capa se pica con seis golpes de barra de picado, introduciendo ésta en dirección paralela a la pared inclinada de tabique móvil (Figura 3.24).

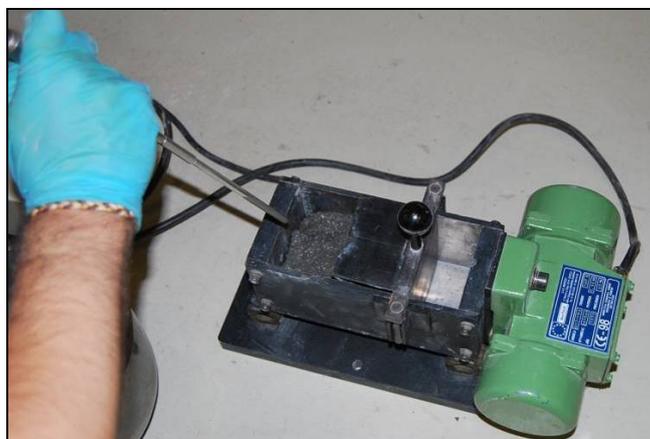


Figura 3.24. Introducción y picado del mortero en el maniabilímetro

- Se engrasa el mortero con los bordes del hueco mediante regla metálica.
- Se levanta el tabique móvil, lo que hará que se ponga en marcha la vibración. Simultáneamente se pondrá en marcha el cronometro. El tiempo transcurrido entre el final del amasado y el principio de escurrimiento bajo vibración será de 4 minutos.
- Se para el cronómetro cuando el nivel del mortero alcanza la marca situada en la cara del molde opuesta a la cara inclinada del tabique móvil. Dicha marca se encuentra a 30 mm de altura (Figura 3.25).

El resultado de la medida es el tiempo “t” empleado por el mortero para llegar a la marca de referencia, en segundos.



Figura 3.25. Escurrimiento del mortero en el maniabilímetro

### 3.2.11. Resistencias mecánicas de los morteros: Flexión y compresión

Las resistencias a flexión y compresión de los morteros endurecidos se realizan tomando como norma de referencia la UNE-EN 1015-11: 2000<sup>93</sup> “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido”. En el método se pueden diferenciar dos fases: La fabricación y curado de las probetas de ensayo y la rotura a flexión y compresión de estas.

---

<sup>93</sup> UNE-EN 1015-11: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

### 3.2.11.1. Fabricación y curado de las muestras

Se fabrican probetas de 160 mm x 40 mm x 40 mm a partir del mortero recién amasado como se ha indicado en el punto 3.1.4. Estas probetas se utilizan en este y otros ensayos de los morteros endurecidos. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se llena en dos capas aproximadamente iguales el molde de acero que contiene tres huecos de las medidas adecuadas para fabricar tres probetas. Cada capa se compacta según norma.
- El exceso de mortero se elimina con una regla para enrasar, de manera que se obtenga una superficie plana y nivelada con el borde superior del molde (Figura 3.26).
- Se coloca un vidrio que cubre las tres probetas realizadas y se lleva el conjunto a la cámara húmeda donde permanece dos días a  $20\pm 2$  °C y  $95\pm 5\%$  de humedad relativa.
- Pasado este tiempo se desmoldan las tres probetas y se dejan en la cámara húmeda durante 5 días más, pasando un total de 7 días en condiciones de alta humedad y temperatura templada.



Figura 3.26. Probetas enrasadas en el molde y pisón prismático

- Las probetas se trasladan a la cámara de curado, a una temperatura igual a la anterior pero con una humedad relativa de  $65\pm 5\%$ , permaneciendo en estas condiciones 21 días hasta la fecha de rotura, a los 28 días de su fabricación.

### 3.2.11.2. Rotura a flexión y compresión de las muestras

Pasados 28 días de la fabricación de las probetas se procede a la rotura de estas para obtener las resistencias a flexión y compresión. Para ello se utiliza una prensa multiensayos de la marca Suzpecar, modelo MEN 101/SDC y un dispositivo para la rotura que permite las roturas a flexión y compresión con solo modificar los apoyos y las piezas que aplican la carga. Estos equipos se ilustran en la Figura 3.27.

El procedimiento operatorio es el siguiente:

- La probeta prismática, de dimensiones normalizadas 160 mm x 40 mm ( $b$ ) x 40mm ( $d$ ), se coloca centrada en el dispositivo de rotura de manera que se apoye en los dos rodillos inferiores situados a 100 mm entre sí, ( $l$ ). En la parte superior del dispositivo se ha colocado un rodillo que va a cargar en el centro de la probeta cuando esta está correctamente colocada (Figura 3.28). Se debe tener la precaución de usar las superficies lisas de la probeta que han estado en contacto con las paredes del molde y no la superficie alisada por el operario en la fabricación de la probeta, tanto para el apoyo como para la carga de la misma.
- Se ejerce la carga por parte del rodillo superior a una velocidad de entre 10 y 50 N/s, dependiendo de la resistencia esperada de la probeta, hasta rotura.
- Se anota la carga de rotura en N ( $F$ ).
- Se calcula la resistencia a flexión en  $\text{N/mm}^2$ ,  $f$ , mediante la expresión:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

- Se rompen tres probetas (dos en algunos casos) y el resultado se calcula como el valor medio de las resistencias con una aproximación de 0,1  $\text{N/mm}^2$ .

La rotura a flexión de cada probeta da lugar a dos semiprobetas que se rompen a compresión de la siguiente manera:

- Se coloca en el dispositivo el plato inferior de apoyo con forma de cuadrado de dimensiones 40 mm x 40 mm, y el plato superior de carga de la misma forma y dimensiones. Ambos platos quedan en el centro del dispositivo y enfrentados verticalmente.
- Se coloca la semiprobeta centrada en el plato inferior, que cuenta con dos apoyos laterales para este cometido. Con esta configuración, ilustrada en la Figura 3.29, se asegura una superficie de rotura ( $S$ ) de 40 mm x 40 mm.

- Se aplica la carga con una velocidad entre 50 y 500 N/s de tal modo que la rotura se produzca entre 30 y 90 s.
- Se registra la carga de rotura en N ( $Q_c$ ).
- La resistencia a compresión se calcula en  $\text{N/mm}^2$  con la expresión:

$$R_c = \frac{Q_c}{S}$$

- Se registra el valor de la resistencia a compresión como la media de las seis semiprobetas (cuatro en algunos casos), con una aproximación de  $0,1 \text{ N/mm}^2$ .



Figura 3.27. Prensa multiensayos y dispositivo de rotura.



Figura 3.28. Configuración para la rotura a flexión de probetas



Figura 3.29. Configuración para la rotura a compresión de probetas

### 3.2.12. Densidad aparente del mortero endurecido

La densidad del mortero endurecido se calcula tomando como referencia la norma UNE-EN 1015-10<sup>94</sup>. Las probetas son prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm. El procedimiento operatorio se puede dividir en dos etapas. El

secado de la probeta en estufa hasta masa constante para obtener la masa seca,  $m_{s,sec}$ . y el cálculo del volumen de la probeta por pesada hidrostática como se indica:

En primer lugar, se sumerge la probeta en agua a  $20\pm 2$  °C hasta masa constante.

- Se introduce un cestillo en agua y se cuelga de una balanza hidrostática por su parte inferior. Se tara la balanza.
- Se introduce la probeta en el cestillo y se deja estabilizar la lectura de la balanza. Se anota la masa aparente de la probeta saturada y sumergida,  $m_{s,i}$ .
- Se saca la probeta del cestillo, se elimina el exceso de agua de sus superficies con un paño húmedo y se pesa, se anota el dato de la balanza que es la masa de la probeta saturada,  $m_{s,sat}$ .
- El volumen de la probeta,  $V_s$ , se calcula con la fórmula:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w}$$

Siendo  $\rho_w$  la densidad del líquido en el que se sumerge la probeta. En este caso el líquido es agua y la densidad se considera  $1 \text{ kg/dm}^3$ .

La densidad se obtiene dividiendo la masa de la probeta secada en estufa,  $m_{s,sec}$ , en kilogramos, por el volumen de la probeta del mortero endurecido,  $V_s$ , en metros cúbicos.

$$\rho_m = \frac{m_{s,sec}}{V_s}$$

Se ensayan dos probetas como mínimo y el resultado se da como el valor medio de los resultados individuales redondeado a  $10 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.2.13. Permeabilidad al vapor del mortero endurecido

En este ensayo se valora el grado de dificultad que ofrece una superficie de mortero al paso del vapor de agua a través suyo, en unas condiciones ambientales establecidas.

<sup>94</sup> UNE-EN 1015-10: 2000, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

La norma que se toma como referencia para la realización del ensayo es la UNE-EN 1015-19<sup>95</sup>, y en ella se explican dos aspectos: La preparación y conservación de las muestras de ensayo y la propia realización del ensayo.

### 3.2.13.1. Preparación y curado de las muestras

Las muestras a ensayar son probetas circulares de mortero de 160 mm de diámetro y, aproximadamente, 15 mm de espesor. Para la fabricación de estas piezas se utiliza un bloque de hormigón celular, gasas de algodón y moldes plásticos con las dimensiones interiores arriba expuestas, ideados específicamente para este ensayo (Figura 3.30).

El proceso de fabricación es el siguiente:

- Se amasa el mortero según se expone en el apartado 3.1.4.
- Se rellenan los moldes fijados sobre el bloque de hormigón celular cubierto con las gasas. Bloque y gasas se han mantenido en cámara húmeda para asegurar su humedad.
- Se extiende el mortero de manera que cubra totalmente los huecos de los moldes y se elimina el exceso de mortero enrasando con los bordes de los moldes.
- Se introduce el bloque en saco de polietileno y se lleva a la cámara húmeda, donde permanece durante 2 días.
- Pasados los 2 días, se desmoldan las probetas circulares y se llevan a la cámara de curado, permaneciendo hasta los 28 días en condiciones de  $20\pm 2$  °C de temperatura y  $50\pm 5\%$  de humedad relativa. En la Figura 3.31 se observa el aspecto de las probetas una vez curadas.

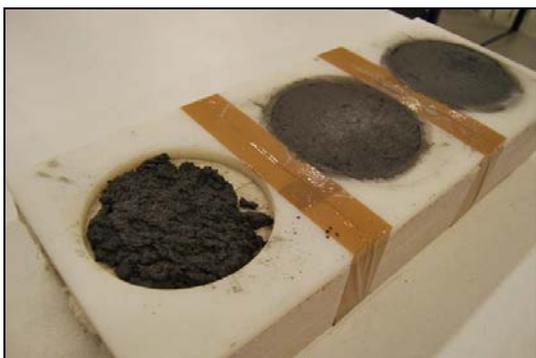


Figura 3.30. Fabricación de probetas de permeabilidad



Figura 3.31. Probetas de permeabilidad

<sup>95</sup> UNE-EN 1015-19: 1999, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

### 3.2.13.2. Procedimiento operatorio para el ensayo de permeabilidad al vapor

Para la realización del ensayo se utilizan recipientes de ensayo circulares que constan de una zona inferior de diámetro 150 mm y altura aproximada de 20 mm, y una zona superior, de diámetro 160 mm y altura aproximada de 15 mm. Para crear una presión de vapor alta y conocida en el interior del recipiente de ensayo se utiliza una disolución saturada de nitrato potásico ( $\text{KNO}_3$ ), que se prepara disolviendo 32 g de nitrato en 100 g de agua.

Se utiliza plastilina para asegurar la estanqueidad del conjunto recipiente-muestra de ensayo.

El procedimiento es el siguiente:

- Se introduce disolución de nitrato potásico en la zona inferior o fondo del recipiente de ensayo hasta que queden aproximadamente 10 mm de distancia entre la disolución y el borde de dicha zona.
- Se coloca la probeta en el recipiente de tal manera que va a descansar sobre el borde que se genera entre la zona inferior, de 150 mm de diámetro, y la zona superior, de 160 mm de diámetro. Con esta configuración tenemos una lámina de aire entre la probeta y la disolución de 10 mm.
- Se sella la junta entre la probeta y el recipiente de ensayo con plastilina (Figura 3.32).



Figura 3.32. Probetas en los moldes en ensayo de permeabilidad al vapor de agua

- En un breve espacio de tiempo el volumen de aire en el interior del recipiente alcanza una humedad relativa del 93,2% por efecto de la disolución. En el recinto donde se realiza el ensayo se establecen unas condiciones de humedad relativa del  $50 \pm 5\%$  a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura. En estas condiciones el vapor de agua en el interior del recipiente tenderá a salir de éste para igualar las presiones de vapor debidas a las humedades relativas. La única superficie por la que

puede salir el vapor de agua es la probeta de mortero, y esto dependerá de lo permeable que éste sea.

A medida que el vapor de agua salga del interior del recipiente, se produce una pérdida de masa del mismo, y esto es lo que se verifica, pesando el recipiente en una balanza a intervalos de tiempo apropiados.

Con el paso del tiempo se alcanzará un flujo de vapor estable, es decir, la cantidad de vapor de agua que atraviesa la probeta por unidad de tiempo es constante. Esto se constata representando gráficamente la masa del recipiente en función del tiempo. Si se pueden colocar tres puntos en línea recta, se considera que las condiciones son estables. De esta forma se determina el flujo de vapor de agua,  $\Delta G/\Delta t$ .

Se calcula la permeanza al vapor de agua ( $\Lambda$ ), en kilogramos por metro cuadrado, por segundo y por pascal ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s Pa}$ ), por medio de la siguiente expresión:

$$\Lambda = \frac{1}{A\Delta_p / (\Delta G / \Delta t) - R_A}$$

donde:

$A$  es la superficie de la embocadura del recinto de ensayo, en metros cuadrados ( $\text{m}^2$ );

$\Delta_p$  es la diferencia de presión del vapor de agua, en pascales (Pa), entre el aire ambiente y la disolución salina, que se calcula mediante el valor de presión de saturación del agua a 20 °C y a la presión atmosférica (supuesta);

$\Delta G/\Delta t$  es el flujo del vapor de agua, en (kg/s);

$R_A$  es la resistencia a la difusión del vapor de agua de la lámina de aire que existe entre la probeta y la disolución salina, en pascales metro cuadrado segundo por kg y por 10 mm de la lámina de aire ( $0,048 \cdot 10^9 \text{ Pa m}^2 \text{ s/kg}$ ).

Se ensayan 3 probetas por dosificación y se calcula la permeanza media, expresada con dos cifras significativas.

La permeabilidad se obtiene multiplicando la permeanza por el espesor de la probeta y el coeficiente de permeabilidad al vapor de agua,  $\mu$ , se calcula dividiendo el equivalente en el aire del factor de permeabilidad al vapor de agua para una temperatura de 20 °C y una presión de una atmósfera,  $1,94 \times 10^{-10}$ , entre el valor de la permeabilidad.

### 3.2.14. Absorción por capilaridad del mortero endurecido

En este ensayo se determina el coeficiente de absorción de agua por capilaridad registrando el aumento de masa de las probetas de ensayo en contacto con agua.

La norma que se sigue como referencia es la UNE-EN 1015-18<sup>96</sup> y el procedimiento del ensayo es el siguiente:

- En primer lugar se fabrican las probetas que se ensayarán una vez curadas. Estas probetas se fabrican y se curan como las de los ensayos de resistencias mecánicas, según se explica en el apartado 3.1.6.1, con la diferencia de que, en la base del molde, se colocan un número establecido de capas de papel de filtro absorbente, y por encima del molde también se coloca este papel. En el momento del desmolde se retiran estos papeles (Figuras 3.33 y 3.34).



Figura 3.33. Molde con las capas de papel de filtro en la base



Figura 3.34. Molde relleno con el mortero

- Una vez curadas, las probetas se secan en estufa hasta peso constante. Se rompe a flexión cada probeta en dos semiprobetas. Las 4 caras laterales de estas semiprobetas se parafinan dejando solo las caras de los extremos sin parafinar, como se observa en la imagen de la Figura 3.35.
- Se introducen las probetas en agua por las caras que se obtienen al romper a flexión. Estas caras deben quedar sumergidas en el agua hasta una altura de entre 5 y 10 mm. Esto se hace en un recipiente de plástico que contiene en su interior una grada para sujetar las probetas y con una tapa para evitar evaporaciones durante el ensayo (Figura 3.36).

<sup>96</sup> UNE-EN 1015-18: 2003, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).



Figura 3.35. Semiprobetas parafinadas

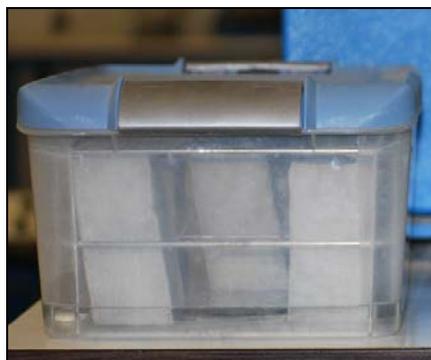


Figura 3.36. Recipiente con semiprobetas en el ensayo de absorción por capilaridad

- A los 10 minutos las probetas se extraen del agua, se secan superficialmente con un paño húmedo, se pesan ( $M_1$ ) y se vuelven a introducir en el agua.
- A los 90 minutos se repite el procedimiento y se obtiene la masa  $M_2$ .
- Se calcula el coeficiente de absorción de agua mediante la expresión.

$$C = 0,1(M_2 - M_1) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$$

Se calculan los valores individuales de las probetas y con ellos, el valor medio, con una aproximación de  $0,05 \text{ kg}/\text{m}^2$ .

- Una vez pesadas las probetas se abren por la mitad de su longitud de manera que se pueda observar y registrar, en mm, la altura a la que ha penetrado el agua en la zona central de la probeta.

### 3.2.15. Resistencia a la adhesión del mortero endurecido

La norma UNE-EN 1015-12<sup>97</sup> define la resistencia a la adhesión, o resistencia de unión, como la tracción máxima al arrancamiento por carga directa perpendicular a la superficie del mortero aplicado sobre un soporte. Para estudiar esta propiedad se procede a la fabricación y curado de probetas específicas que, posteriormente, serán ensayadas.

Las probetas se fabrican y curan de la siguiente forma:

---

<sup>97</sup> UNE-EN 1015-12: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

- Se han seleccionado ladrillos cerámicos tipo machetón de 40 cm longitud, de la casa Cerámica San Pedro, para la aplicación de mortero sobre ellos. Estas piezas son un soporte habitual de los morteros y tienen una tabla suficiente para conseguir un número elevado de superficies circulares de diámetro 50 mm, que son las que se van a ensayar.
- Se montan sobre la tabla del ladrillo unos perfiles plásticos con una altura de 1 cm, de manera que queda limitado un volumen con una base rectangular y una altura de 1 cm (Figura 3.37). Este volumen se va a rellenar con el mortero a ensayar.



Figura 3.37. Ladrillo y perfiles para la aplicación de mortero en el ensayo de adhesión



Figura 3.38. Ladrillo en agua durante 1 minuto

- Se introduce en agua, durante 1 minuto, el ladrillo con los perfiles montados. En este tiempo el ladrillo absorbe un 8% de agua, siendo su absorción hasta saturación de un 14%.
- Se amasa el mortero, según lo indicado en el apartado 3.1.4, y se aplica sobre el ladrillo, rellenando en exceso el volumen limitado por los perfiles. Se elimina el exceso mediante movimientos de sierra de una regla colocada en ángulo de  $45^\circ$  con respecto al mortero (Figura 3.39).
- Con un anillo troncocónico de acero, de diámetro interior  $50 \pm 1$  mm, se cortan superficies circulares presionando y haciendo girar éste por su canto vivo sobre el mortero fresco hasta que entre en contacto con el soporte. Se practican tantas superficies circulares como permite el volumen acotado por los perfiles, con un mínimo de 5 (Figura 3.40).



Figura 3.39. Aplicación del mortero en molde limitado por los perfiles plásticos



Figura 3.40. Superficies circulares cortadas en fresco con el anillo troncocónico

- Una vez cortadas las superficies circulares, se retiran cuidadosamente los perfiles plásticos, se introduce el ladrillo con el mortero en una bolsa de polietileno, se cierra herméticamente la bolsa y se deja 7 días a  $20 \pm 2$  °C. Pasado este tiempo, la probeta se saca de la bolsa y se conserva al aire durante otros 21 días, a una temperatura constante de  $20 \pm 2$  °C y una humedad relativa del  $65 \pm 5\%$ .

A los 28 días de la fabricación de las probetas se procede a ensayarlas. Para ello se utilizará un medidor de adherencia electrónico de la casa Neurtek, modelo KN-10 y unas sufrideras de 50 mm de diámetro, que se pegarán a las superficies cilíndricas cortadas y permitirán la aplicación de la carga a tracción sobre ellas (Figura 3.41). El procedimiento es el siguiente:

- Se pegan las sufrideras metálicas sobre las superficies cilíndricas cortadas en el mortero, mediante un adhesivo de base resina epoxi de dos componentes. Se deja secar el adhesivo durante un día.
- Se ancla el medidor de adherencia a la sufridera mediante un vástago cilíndrico. Se aplica la carga de tracción perpendicular a las áreas de ensayo, accionando el volante del medidor a una velocidad uniforme hasta la rotura. Se anota la carga aplicada ( $F_u$ ), que aparece en la pantalla del medidor.
- Como área de rotura ( $A$ ) se elige el área de la superficie de ensayo de la probeta cilíndrica, en  $\text{mm}^2$ .

Se calcula la resistencia a la adhesión individual ( $f_u$ ) en  $\text{N}/\text{mm}^2$ , con una aproximación de  $0,05 \text{ N}/\text{mm}^2$ , mediante la expresión:

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

La resistencia a la adhesión (resistencia de unión) es el valor medio de los valores individuales, con una aproximación de  $0,1 \text{ N}/\text{mm}^2$ .



Figura 3.41. Medidor de adherencia electrónico Neurtek aplicado sobre una probeta mediante sufridera

Los tipos de rotura que se pueden obtener se agrupan en tres:

- Rotura adhesiva: Cuando la rotura se produce en la interfase entre el mortero y el soporte. El valor del ensayo es igual a la resistencia a la adhesión.
- Rotura cohesiva en el mortero: La rotura se produce en el mortero quedando parte adherida al soporte. La resistencia a la adhesión es mayor que el valor del ensayo.
- Rotura cohesiva en el soporte: La rotura se produce en el soporte quedando parte de este adherido a la superficie circular de mortero. La resistencia a la adhesión es, también, mayor que el valor del ensayo.



Figura 3.42. Probeta ensayada con cinco discos

### 3.2.16. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería

En este ensayo se estudia la respuesta de pequeñas muestras de fábrica de albañilería a los esfuerzos a cortante. Las probetas constan de tres ladrillos unidos por mortero colocado sobre sus tablas. Para aplicar la carga a cortante se establece un sistema de carga a cuatro puntos en la prensa. Las normas tomadas como referencia para la realización del ensayo son la UNE-EN 1052-3: 2003<sup>98</sup> y la UNE-EN 1052-3: 2003/A1<sup>99</sup>.

En primer lugar se procede a la fabricación de las probetas de fábrica de albañilería. Para ello se van a utilizar ladrillos cerámicos hueco doble de la marca Cerámicas Llanos, de dimensiones 240 mm x 110 mm x 90 mm, y cuya absorción de agua hasta saturación es del 18%. La fabricación de las probetas se realiza como se indica a continuación:

- Primero se introducen tres ladrillos cerámicos, secados previamente en estufa, en agua durante 1 minuto. En este tiempo los ladrillos absorben un 9% de agua, de esta forma tienen una humedad conocida que no alcanza la saturación pero evita que éstos retiren agua del mortero con el que se van unir y lo resequen (Figura 3.43).
- Se coloca un primer ladrillo con su tabla horizontal y se aplica sobre ella una pellada de mortero tal que al acomodar un segundo ladrillo encima la junta de mortero entre ambos esté comprendida entre 8 y 15 mm (Figura 3.44). Se comprueba, mediante nivel y escuadra, que la segunda pieza queda alineada y nivelada con respecto a la primera.
- De la misma forma, se coloca la tercera pieza de la probeta y se eliminan las rebabas de mortero, que hayan podido quedar en las juntas, con una paleta. En la imagen de la Figura 3.45 se muestra la probeta terminada.

---

<sup>98</sup> UNE-EN 1052-3: 2003, Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).

<sup>99</sup> UNE-EN 1052-3: 2003/A1, Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).



Figura 3.43. Ladrillos inmersos en agua para la fabricación de probeta a cortante



Figura 3.44. Ladrillo con mortero extendido sobre su tabla

- o La probeta se introduce en una bolsa de polietileno y se comprime con una masa distribuida uniformemente para dar una tensión vertical de entre  $2 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$  y  $5 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ . En este caso se consigue la compresión con una probeta de hormigón sobre un tablero colocado encima de la probeta (Figura 3.46). El conjunto permanece inalterado hasta el ensayo, a los  $28 \pm 1$  días desde la fabricación.



Figura 3.45. Probeta para ensayo de resistencia inicial a cortante terminada



Figura 3.46. Probetas en proceso de curado en bolsas de polietileno y con carga

Para ensayar las probetas se emplea una prensa multiensayos de la marca Suzpecar, modelo Mem 101, de 20 toneladas de capacidad de carga. Se sigue el procedimiento B, expuesto en la ampliación A1 de la norma UNE-EN 1052-3, por el que se ensayan 6 probetas con carga de compresión igual a cero. Se procede como sigue:

- o La probeta se coloca verticalmente en la prensa, es decir, con las tablas de los ladrillos en posición vertical.

- Como apoyos inferiores de la probeta se colocan cilindros metálicos de diámetro específico. Estos apoyos se colocan en los ladrillos exteriores, a una distancia establecida de las llagas de mortero.
- Como mecanismo de carga se colocan dos cilindros metálicos sobre el ladrillo central, del mismo diámetro que los apoyos inferiores, de tal manera que ambos cilindros queden a la distancia adecuada de las llagas de mortero.
- Con esta configuración se va a ejercer carga en el lado interno de cada llaga que se va a transmitir a los apoyos inferiores, que se encuentran en el lado externo de las llagas de mortero, consiguiéndose, de esta forma, aplicar esfuerzos a cortante a los morteros. En la imagen de la Figura 3.47 se ilustra la conformación del equipo y probeta para el ensayo.

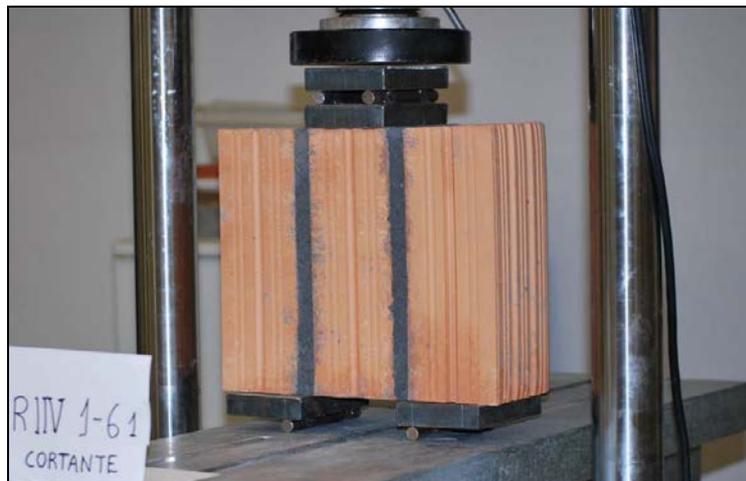


Figura 3.47. Probeta colocada en la prensa y preparada para su rotura

- Se aplica la tensión cortante a un ritmo de  $0,1 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min})$  hasta la rotura, o fallo a cortante, de la probeta. Se anota la carga máxima en N.
- Se observa también el tipo de fallo que se ha producido. Los tipos de fallos que se pueden producir se ilustran a continuación en la Figura 3.48. Los patrones de fallos considerados correctos son el A.1 y el A.2, debiéndose romper probetas adicionales cuando se producen los demás tipos de rotura.

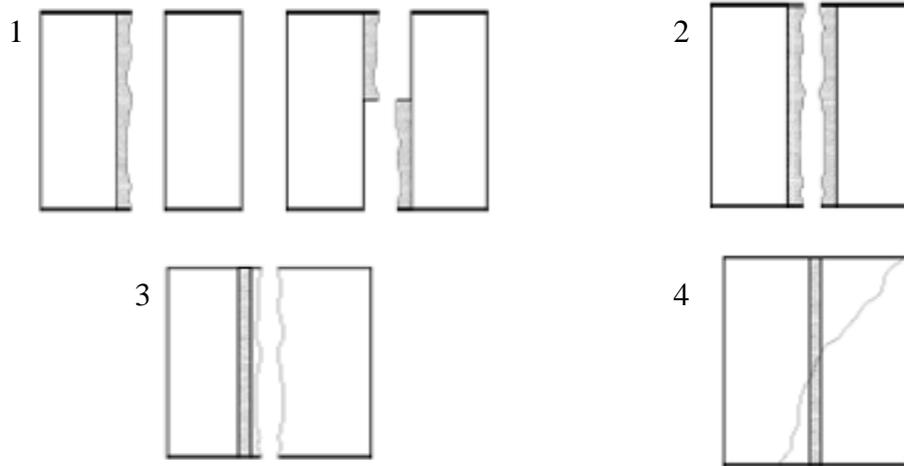


Figura 3.48. Tipos de fallos en el ensayo de resistencia inicial a cortante. De izquierda a derecha y de arriba abajo: 1: Fallo a cortante en el área de unión de la pieza/mortero bien sobre una o dividida entre las caras de dos piezas. 2: Fallo a cortante sólo en el mortero. 3: Fallo a cortante en la pieza. 4: Fallo de aplastamiento y/o de rotura de las piezas

En las Figuras 3.49 y 3.50 se ilustran dos de las roturas como ejemplos de distintos tipos de fallos que se han dado en esta investigación.



Figura 3.49. Fallo a cortante tipo 3



Figura 3.50. Fallo a cortante tipo 1 entre las dos caras de dos piezas

Para calcular la resistencia a cortante según el procedimiento B, expuesto en la ampliación de la norma UNE-EN 1052-3, se calculan las resistencias a cortante de las muestras individuales según la expresión:

$$f_{voi} = \frac{F_{i,máx}}{2A_i}$$

Donde:

$f_{voi}$  es la resistencia a cortante, en N/mm<sup>2</sup>;

$F_{i,máx}$  es la carga máxima, en N;

$A_i$  es la sección transversal de las muestras paralela a la fuerza cortante, en  $\text{mm}^2$ .

A partir de los resultados individuales, se calcula la resistencia inicial a cortante media,  $f_{vo}$ , con una aproximación de  $0,01 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.3. Ensayos químicos

#### 3.3.1. Cloruros solubles en agua

La determinación de cloruros solubles en agua ha sido realizada a las pizarras, usadas como áridos para los morteros, según el capítulo 7 de la norma UNE-EN 1744-1<sup>100</sup>. El método utilizado en esta norma se basa en la valoración por el método de Volhard, que consiste, de forma resumida, en la extracción de los iones cloruro de las muestras sólidas mediante disolución en agua, la adición a la disolución de un exceso de nitrato de plata y la valoración final del nitrato de plata que queda en la disolución después de haber reaccionado todos los cloruros.

El proceso realizado es el siguiente:

- Se preparan 500 g de la muestra a ensayar que pasen por el tamiz de 16 mm y se secan a  $110^\circ\text{C}$ .
- Se introducen las muestras en botellas de 2 litros de capacidad y se añade a cada botella una masa de agua destilada igual a la de la muestra.
- Se agitan las botellas continuamente durante 60 minutos mediante agitador rotatorio (Figura 3.51).



Figura 3.51. Extracción de cloruros mediante agitador rotatorio

---

<sup>100</sup> UNE-EN 1744-1: 2010, Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico, Asociación Española de Normalización y Certificación (2010).

- Se filtran los extractos haciéndolos pasar por filtros de textura media hasta que se recogen, como mínimo, 100 ml del filtrado con un tono claro u opalescente en vasos de precipitados.
- Se pipetea 100 ml del filtrado y se lleva a erlenmeyer, donde se añaden 5 ml de ácido nítrico.
- Se añaden 5 ml de disolución de nitrato de plata. En este momento se formará el cloruro de plata, muy insoluble, que aparecerá como precipitado blanco. En el caso de que el filtrado tenga cierta turbidez, la formación del precipitado puede pasar desapercibida.
- Se añaden 2 ml de 3,5,5 trimetil 1 hexanol, se tapa y se agita vigorosamente el erlenmeyer. En este momento se produce la coagulación de los precipitados de plata que pueda haber en la muestra.
- Después de destapar y lavar el tapón, añadiendo las aguas de lavado al erlenmeyer, se añade el indicador de sulfato de amonio y de hierro III y se valora la muestra mediante adición de tiocianato potásico de una bureta de la que se deja caer, gota a gota.



Figura 3.52. Valoración del exceso de plata mediante adición de tiocianato potásico.

- Durante la valoración la plata que hay en la disolución forma tiocianato de plata apareciendo un precipitado blanco en el coagulado. Cuando ya no hay más plata se forma tiocianato de hierro III, que es marrón anaranjado como se ve en la imagen de la Figura 3.53.



Figura 3.53. Aparición de coloración en el punto final de la valoración.

El contenido en iones cloruro  $C$  del árido se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$C = 0,003546\{V_5 - (10C_T V_6)\} \text{ (en \%)}$$

donde

$V_5$  es el volumen de la disolución de nitrato de plata, en este caso 5 ml;

$V_6$  es el volumen añadido de la disolución de tiocianato (en ml);

$C_T$  es la concentración de la disolución de tiocianato (en mol/L);

El resultado se expresa como la media de las determinaciones de dos extractos en porcentaje, redondeando al 0,001% más próximo.

### 3.3.2. Compuestos totales de azufre

Se calcula el contenido total de azufre de las pizarras siguiendo lo expresado en el capítulo 11, apartado 1 de la norma UNE-EN 1744-1<sup>100</sup>. El método se fundamenta en la extracción de compuestos de azufre de los áridos, en forma de sulfatos, y la precipitación de éstos por formación de  $\text{BaSO}_4$ , no soluble en agua. El contenido en azufre se expresa en porcentaje en masa del árido.

El procedimiento se puede dividir en dos etapas independientes, la extracción de compuestos de azufre y la determinación del contenido de azufre en el extracto.

La extracción se realiza como sigue:

- Se toma una muestra representativa de 500 g ( $m_2$ ) del material a ensayar y se seca a 110 °C. La muestra se reduce a 20 g y se trituran las partículas hasta que pasen a través de un tamiz de 125  $\mu\text{m}$ .
- Se toma 1g de la submuestra y se lleva a un vaso de precipitados en el que se añadirán, en vitrina, 20 ml de agua destilada y 10 ml de peróxido de hidrógeno, que será el oxidante que transformará los compuestos de azufre en sulfatos.
- Se calienta la muestra hasta temperatura por debajo del punto de ebullición y se añade ácido clorhídrico, dejando el vaso en baño termostático durante 30 min. A continuación se calienta el vaso hasta temperatura por debajo del punto de ebullición para llevar la disolución a medio neutro mediante la adición de hidróxido de amonio. Se comprueba la evolución del pH mediante adición de rojo de metilo que vira de color rosado a amarillo a pH 6,3.
- Se hierve a fuego lento durante 30 s. y después se filtra (Figura 3.54). Se lava el papel de filtro una vez con agua destilada caliente.



Figura 3.54. Filtrado de los extractos con los sulfatos disueltos

Una vez se ha finalizado la extracción se procede con la determinación del contenido de azufre como sigue:

- Se acidifica el extracto con 1 ml de ácido clorhídrico concentrado y se lleva a ebullición. Se deja hervir durante  $5 \pm 0,5$  min.
- Se mantiene la disolución al punto de ebullición mientras se añaden, gota a gota, 10 ml de disolución de cloruro de bario al 10%, calentada a una temperatura justo por debajo del punto de ebullición, al tiempo que se agita vigorosamente (Figura 3.55). En este momento, si hay sulfatos en la disolución, se forma el precipitado de sulfato de bario enturbiándose la disolución.



Figura 3.55. Disolución preparada para adición, gota a gota, de cloruro de Bario

- Se deja reposar y se filtra la muestra, recogiendo cuidadosamente el precipitado de sulfato de bario en el filtro de papel, lavando muy bien el vaso con agua destilada caliente.
- El filtro de papel con el precipitado se introduce en un crisol de porcelana, calcinado y pesado previamente, y todo ello se introduce en un horno mufla. Se mantiene el horno a 110 °C durante 30 minutos para secar el papel de filtro y el precipitado y, seguidamente, se eleva de forma progresiva la temperatura hasta 925 °C, donde permanecerá 1 hora para calcinar el sulfato de bario (Figura 3.56).
- Se deja enfriar el crisol con el precipitado en un desecador y se pesa el conjunto redondeando a los 0,1 mg más próximos. Se calcula por diferencia la masa del precipitado ( $m_1$ ).

El contenido en azufre total en el árido, expresado como  $S$  y redondeado al 0,1% más próximo, se calcula mediante la expresión:

$$S = m_1 / m_2 \times 13,74 \text{ (en \%)}$$



Figura 3.56. Calcinado de los crisoles en horno mufla



Figura 3.57. Crisoles con sulfato de bario después de su calcinación

### 3.3.3. Sulfatos solubles en ácido

Los sulfatos solubles en ácido se verifican según establece el capítulo 12 de la norma UNE-EN 1744-1<sup>100</sup>. El principio del método es la extracción de los sulfatos de una porción de árido empleando una disolución de ácido clorhídrico. El contenido en iones sulfato se determina por gravimetría y se expresa como porcentaje en masa del árido.

El procedimiento se puede dividir en las mismas dos fases independientes que en el caso de la determinación de los compuestos totales de azufre. De hecho el ensayo se realiza de la misma manera a excepción del proceso de extracción, en el que se ensayan 8 g de muestra ( $m_2$ ) que pasa por el tamiz de 125  $\mu\text{m}$ , en lugar de 1 g, y para extraer los sulfatos se rocía directamente esta muestra de ensayo con una disolución diluida de clorhídrico caliente, en lugar de oxidar previamente la muestra con el agua oxigenada.

El contenido en sulfatos solubles en ácido ( $m_1$ ), expresado como  $\text{SO}_3$  y redondeado al 0,1% más próximo, se calcula mediante la expresión:

$$\text{Contenido en sulfatos (SO}_3\text{)} = m_1 / m_2 \times 34,30 \quad (\text{en } \%)$$

### 3.4. Ensayos de durabilidad

#### 3.4.1. Heladicidad

El objeto de este ensayo es determinar el comportamiento de los morteros frente a la acción del hielo. Para ello, y ante la ausencia de una norma específica para estos materiales, se realiza el ensayo de heladicidad adaptándolo a partir del de ladrillos cerámicos, ya que ambos materiales se presentan muchas veces trabajando juntos en diversas unidades de obra y en los mismos ambientes. Por este motivo la norma que se toma como referencia es la UNE 67028 EX: "Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad".

El ensayo consiste en someter a las probetas de mortero a ciclos hielo-deshielo. Para ello se requiere una cámara frigorífica, capaz de alcanzar la temperatura de  $-15 \pm 5$  °C, y un tanque de deshielo que permita la inmersión de las probetas de tal forma que estas recuperen la temperatura de  $15 \pm 5$  °C en un período máximo de 3 horas. En la imagen de la Figura 3.58 se muestran ambos equipos.

El procedimiento operativo es el siguiente:

- Se secan las probetas que se van a someter a los ciclos. Estas son las probetas prismáticas normalizadas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, debidamente curadas durante 28 días. Se ensayan un mínimo de dos probetas por dosificación. Una vez secas se pesan.
- Las probetas se introducen en el tanque de deshielo durante 48 h a una temperatura de  $15 \pm 5$  °C, teniendo la precaución de introducir las en el agua gradualmente, de manera que no se encuentren totalmente hundidas antes de 3 h.
- Se sacan las probetas del agua y se dejan escurrir durante 1 minuto. Se introducen en la cámara frigorífica a  $-15 \pm 5$  °C, de forma que no

- exista contacto entre ellas ni con las paredes de la cámara. Permanecen así durante 18 h.
- Se sacan las probetas de la cámara y se introducen en el tanque de deshielo durante 6 h.
  - El ciclo de 18 h en la cámara frigorífica y 6 horas en el tanque de deshielo se repite 25 veces. Durante cualquier período de interrupción, las probetas se mantienen en la cámara frigorífica a  $-15\pm 5$  °C.
  - Después de los ciclos, las probetas se secan hasta masa constante.



Figura 3.58. Cámara frigorífica, tanque de deshielo y probetas para el ensayo hielo-deshielo.

Los efectos de los ciclos hielo-deshielo sobre las probetas se valoran en tres aspectos: La inspección visual del aspecto exterior, la medición de las variaciones de masa y la comparación de la resistencia a compresión de las probetas sometidas a los ciclos con probetas de referencia de la misma edad y que no han sido sometidas a ciclos.

#### 3.4.2. Ensayo al dióxido de azufre (Kesternich)

En este ensayo se valora la resistencia de los materiales a una atmósfera que contiene humedad condensada y dióxido de azufre. Este tipo de ambiente se puede equiparar a los que se producen en zonas con contaminación industrial.

La norma que se toma de referencia para la realización del ensayo es la UNE-EN ISO 6988<sup>101</sup> y en ella se especifican el equipo a utilizar así como el procedimiento de ensayo.

El ensayo se va a realizar en una cabina preparada para ello según la norma y que incluye en su interior una cámara de ensayo. Esta cámara tiene, en su parte inferior, una cavidad con capacidad de 2,5 dm<sup>3</sup>, que se llena de agua destilada al inicio del ensayo. En un lateral incluye una tubería que la conecta con un sistema para introducir una cantidad específica de dióxido de azufre, medida mediante bureta de gas con parafina líquida, para controlar la presión. El equipo también dispone de un dispositivo de calentamiento que permite calentar el interior de la cámara de ensayo hasta 40 °C en 1,5 h y mantener la presión atmosférica interior a esta temperatura. Por último, la cámara posee un sistema de apertura automática de la puerta de manera que ésta se abre pasado un determinado tiempo para facilitar la salida del gas. La cabina equipa una extracción forzada que saca el gas hacia el exterior. En la imagen de la Figura 3.59 se ilustra la cabina con la cámara y los distintos dispositivos en su interior.

Las muestras de ensayo que se van a ensayar son probetas prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm y se introducirán al menos dos probetas por cada tipo de mortero a ensayar.

El procedimiento de ensayo consta de una serie de 15 ciclos y cada ciclo consiste en mantener las probetas 8 horas en la cámara de ensayo, a 40 °C de temperatura, con humedad y con un volumen de dióxido de azufre, y 16 horas a temperatura y humedad de laboratorio.

Las etapas del procedimiento son las siguientes:

- Las probetas que van a ser ensayadas, una vez curadas a 28 días según norma, se secan a 70 °C hasta peso constante y se anotan sus pesos. También se inspeccionan visualmente y se marcan las posibles irregularidades que pueda haber en su superficie.
- Se colocan las probetas en la cámara de ensayo distanciadas entre ellas y también a las paredes de la cámara (Figura 3.60).
- Se llena con agua destilada la cavidad situada en el suelo de la cámara y se cierra herméticamente ésta.
- Se introducen 0,2 dm<sup>3</sup> de dióxido de azufre en la cámara, a través de la tubería de alimentación de gas que conecta la cámara con la bureta en la que se mide el volumen de gas.

---

<sup>101</sup> UNE-EN ISO 6988: 1996, Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad, Asociación Española de Normalización y Certificación (1996).

- Se conecta la calefacción de la cámara que elevará la temperatura de esta a 40 °C y se cierra la cabina. La temperatura se mantiene así durante 8 horas.



Figura 3.59. Cabina para el ensayo al dióxido de azufre



Figura 3.60. Probetas colocadas para el ensayo al dióxido de azufre

- Pasadas las 8 horas la puerta de la cámara se abrirá automáticamente y el gas saldrá por la extracción superior que posee la cabina. La calefacción de la cámara se corta.
- Las probetas se mantienen 16 horas en el interior de la cabina pero a  $t^{\circ}$  y humedad de laboratorio.

Pasados los 15 ciclos se procede a la evaluación de los resultados estudiando tres aspectos. En primer lugar se realiza una inspección visual de las probetas verificando los cambios que se puedan haber producido en la superficie de las mismas. El segundo criterio es la modificación de las masas por lo que las probetas se secan hasta peso constante, se pesan y se anotan los pesos, que se compararán con los que presentaban las probetas antes de los ciclos. Finalmente se someten a rotura a flexión y a compresión y se comparan estos resultados con los obtenidos de probetas de la misma edad que no han sido sometidas a ciclos.

### 3.4.3. Resistencia a la cristalización de sales

En este ensayo se evalúa la resistencia de los morteros a la cristalización de sales en su interior. Para ello se toma como referencia el procedimiento para piedra natural que se explica en la norma UNE-EN 12370<sup>102</sup>, ya que no existe normativa específica de morteros en este tipo de ensayos de durabilidad.

El ensayo se basa en someter a las probetas de mortero a 15 ciclos sucesivos. Cada ciclo consiste en sumergir las muestras en una solución de sulfato sódico, secarlas a alta temperatura y dejarlas que se enfríen hasta temperatura constante para iniciar otro ciclo.

Para realizar el ensayo se procede como sigue:

- Se ensayan probetas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, con un mínimo de dos por dosificación. Estas probetas se limpian y secan hasta peso constante y se anotan sus pesos.
- Las probetas se introducen en una bandeja con solución de sulfato sódico decahidrato de tal manera que queden totalmente cubiertas con el líquido y que haya una distancia entre ellas de 10 mm y de 20 entre las probetas y las paredes de la bandeja (Figura 3.61). La bandeja se cubre, para reducir la evaporación, y el conjunto se mantiene así durante 2 horas a  $20 \pm 0,5$  °C de temperatura.



Figura 3.61. Probetas inmersas en disolución de sulfato de sodio decahidrato en el ensayo de resistencia a cristalización de sales.

<sup>102</sup> UNE-EN 12370: 1999, Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

- Después de la inmersión, las probetas se retiran de la solución y se secan en una estufa. Previamente en esta se ha colocado una bandeja de agua para asegurar una alta humedad relativa a la hora de introducir las probetas. La temperatura se fija a  $105\pm 5$  °C y las probetas permanecen así 18 horas. La disposición de las probetas en la estufa se ilustra en la Figura 3.62.
- Se retiran las probetas y se dejan enfriar a temperatura ambiente durante  $2\pm 0,5$  horas antes de volver a sumergirlas en una nueva solución de sulfato sódico.
- Realizados los 15 ciclos, las probetas se retiran del horno y se conservan 24 horas en agua a  $23\pm 5$  °C. Finalmente, se lavan con agua corriente, se secan hasta masa constante y se pesan de nuevo. Este proceso se realiza solo con las probetas cuyo estado de cohesión lo permite.



Figura 3.62. Probetas en estufa para su secado en el ensayo de resistencia a cristalización de sales. Obsérvese la bandeja con agua debajo de ellas

La evaluación de los resultados se va a realizar sobre tres aspectos. En primer lugar se realiza una inspección visual de las probetas verificando los cambios que se puedan haber producido en la superficie de las mismas. El segundo criterio es la modificación de las masas en porcentaje sobre las masas iniciales. Por último, las probetas se someten a rotura a flexión y a compresión y se comparan estos resultados con los obtenidos de probetas de la misma edad que no han sido sometidas a ciclos.

## 3.5. Ensayos de reactividad

### 3.5.1. Introducción

La reactividad de las pizarras con los álcalis de los cementos supone una importante problemática para el uso de estos materiales en la fabricación de hormigones y morteros por lo que en esta tesis se dedica un capítulo en exclusiva al estudio de estas reactividades y los tratamientos que se han probado para evitarlas. En dicho capítulo se explican de forma pormenorizada los ensayos disponibles para la detección de reactividad de los áridos con los álcalis, por lo que en este apartado se van a citar someramente los que se han llevado a cabo en este trabajo.

### 3.5.2. Determinación de la reactividad por el método acelerado en probetas de mortero

Este ensayo se basa en la norma UNE 146508: 99 EX<sup>103</sup> y permite evaluar la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de un árido a través de la medida del cambio de longitud experimentado por una serie de probetas de mortero sumergidas en una disolución de NaOH 1N a  $80 \pm 2$  °C.

Las probetas de mortero tienen forma de prisma rectangular (Figura 3.63) y la composición de este está definida en la norma. El cemento utilizado será de alto contenido en álcalis mientras que la fracción granulométrica del árido que se estudia estará comprendida entre 0,16 y 5 mm.

Las probetas de mortero se desmoldan a las 24 horas y se introducen en agua a 80 °C durante otras 24 horas. Transcurridas estas se mide la longitud inicial de las probetas y se pasan a la disolución de hidróxido sódico de concentración 1N a 80 °C, donde permanecerán durante 14 días (28 en algunos casos).



Figura 3.63. Molde con 3 probetas de 25x25x285 mm<sup>3</sup> recién fabricadas

<sup>103</sup> UNE 146508: 99 EX, Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero. Hormigón estructural. Normas UNE e Instrucción EHE, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

Durante este tiempo se realizarán al menos tres medidas de la longitud de las probetas y en el día 14 se realiza la última medida.

La norma indica que una expansión, con relación a la longitud inicial de la probeta, menor de 0,10% a los 14 días permite considerar al árido como no reactivo, mientras que una expansión superior a 0,20% corresponde a un árido potencialmente reactivo. Si la expansión se encuentra entre los dos valores anteriores se continúa con el ensayo hasta los 28 días, fecha en la que, si la expansión es mayor a 0,20 indica un árido potencialmente reactivo.

Este ensayo es muy utilizado actualmente, ya que permite establecer en un tiempo muy reducido la posibilidad o no de que un árido sea reactivo. Sin embargo los estudios comparativos llevados a cabo indican que este método es excesivamente severo, ya que identifica como reactivos áridos que han demostrado buen comportamiento en bloques de hormigón expuestos a la intemperie durante más de 10 años, método comparativo considerado de referencia, o en el ensayo de expansión de prismas de hormigón, que ha demostrado muy buena fiabilidad.<sup>104</sup>

Por tanto, la determinación de la reactividad de morteros mediante este procedimiento debería ser utilizada sólo para aceptar y no para rechazar áridos para su uso en hormigones o morteros.

Además, si un agregado falla este ensayo, se podrían emplear otros métodos, como el de los prismas de hormigón, para confirmar los resultados antes de rechazar o poner límites al uso del material.<sup>105</sup>

Otra ventaja de este método es que puede ser usado para determinar las cantidades mínimas de adiciones que se precisan para suprimir la reactividad de un árido concreto en contacto con cemento de alto contenido en álcalis.

Se considera que el riesgo de que ocurran expansiones perjudiciales en hormigones o morteros en servicio es bajo cuando se usa una combinación de materiales que cumplen con los criterios del ensayo acelerado en probetas de mortero.

---

<sup>104</sup> Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1842–1856.

<sup>105</sup> Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., Rogers, C.A. Prevention of damage due to alkali-aggregate reaction (AAR) in concrete construction – Canadian approach, *Cement, Concrete and Aggregates*. 19 (1) (1997) 26–30.

### 3.5.3. Determinación de la reactividad por el método químico

El método se describe en la norma UNE 146507-1: 99 EX<sup>106</sup> y consiste en atacar la fracción granulométrica del árido comprendida entre 0 y 0,315 mm de la muestra a ensayar con una disolución de NaOH 1N a 80 °C, midiendo en el filtrado, después de determinados tiempos de reacción, las concentraciones de sílice disuelta y de sodio (en la forma de su óxido) por colorimetría y espectrofotometría de absorción atómica, respectivamente.

Un árido reactivo, en las condiciones del ensayo, será atacado por el hidróxido sódico y cederá sílice a la disolución con lo que, a medida que aumentan los tiempos de reacción, se detectarán concentraciones cada vez mayores de sílice y menores de sodio en el líquido.

La evaluación de la reactividad potencial del árido se realiza calculando la relación molar  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  a las diferentes edades en las que se hace reaccionar cada muestra. Estos resultados se plasman en un gráfico (Figura 3.64) en el que se diferencian tres zonas para clasificar el árido ensayado como no reactivo (zona A), potencialmente reactivo (zona B) o potencialmente reactivo con efecto pésimo (zona C).

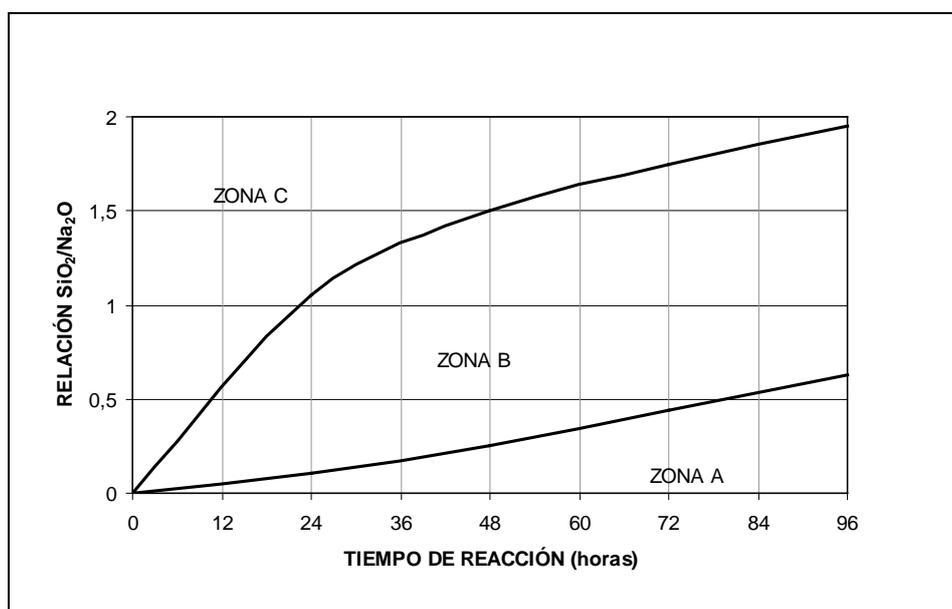


Figura 3.64. Gráfico relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  en función del tiempo (cinética de la reacción) para la determinación de la reactividad potencial de los áridos

<sup>106</sup> UNE 146507-1: 99 EX, Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. Hormigón estructural. Normas UNE e Instrucción EHE, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

Este procedimiento ha sido uno de los más extendidos en cuanto a su uso debido, en gran medida, a la rapidez con la que se puede determinar la reactividad de un árido, pero presenta importantes limitaciones que ponen en duda su fiabilidad.

Por un lado, en el relativamente corto tiempo de ensayo, no todos los áridos liberan a la disolución la cantidad total de sílice que aportarían de alargarse este tiempo e, incluso para ciertos agregados como es el caso del ópalo, la cantidad de disolución alcalina que se aporta no es suficiente para disolver toda la sílice reactiva del mineral.<sup>107</sup> Por otro, lado el aporte de álcalis por parte de los áridos puede falsear la medida del sodio en disolución, haciendo que esta sea mayor de la que correspondería tras la disolución de la sílice.

Estas limitaciones hacen que, como algunos autores indican, este método solo sea apropiado para identificar áridos muy reactivos, con cinética rápida, y que, en el caso de áridos clasificados como no reactivos según este ensayo, se deban aplicar otras técnicas que confirmen este resultado.<sup>108</sup>

#### 3.5.4. Determinación de la reactividad potencial por el método de los prismas de hormigón

Este procedimiento se basa en la medida del cambio de longitud de probetas de hormigón, realizadas con el árido a ensayar, mantenidas a 38 °C y 100% de humedad relativa, según la norma UNE 146509: 99 EX<sup>109</sup>

La dosificación del hormigón que se ensaya viene determinada en la norma. El árido a evaluar debe tener una granulometría específica. El cemento debe ser de alto contenido en álcalis y este dato se debe conocer para poder enriquecer el hormigón fabricado hasta alcanzar un contenido en NaOH equivalente del 1,25% en peso de cemento. Esto se consigue mediante la adición, al agua de amasado, de la cantidad necesaria del hidróxido.

Las probetas que se fabrican con el hormigón descrito son prismas rectangulares de medidas 75 mm x 75 mm x 275 mm (Figura 3.65) y se deben conservar de pie, en contenedores herméticos con una cantidad de agua en el fondo que no esté en contacto con las probetas, de manera que se asegure una humedad del 100% cuando estos contenedores se mantengan a 38 °C de temperatura en el dispositivo de curado adecuado.

---

<sup>107</sup> Binal, A. The determination of gel swelling pressure of reactive aggregates by ASGPM device and a new reactive-innocuous aggregate decision chart. *Construction and Building Materials*. 22 (2008) 1–13.

<sup>108</sup> Wigum, B. J., French, W. J., Howarth, R. J., Hills, C. Accelerated tests for assessing the potential exhibited by concrete aggregates for alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites*. 19 (1997) 45 I-476.

<sup>109</sup> UNE 146509: 99 EX, Determinación de la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos. Método de los prismas de hormigón. Hormigón estructural. Normas UNE e Instrucción EHE, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).



Figura 3.65. Molde de 75x75x275 mm con inserciones metálicas para la fabricación de probetas prismáticas de hormigón

La norma indica que en el período de un año se deben realizar un número de medidas de la longitud de las probetas, con un equipo que incluya un reloj comparador (Figura 3.66). Se determinará el cambio de dichas longitudes en porcentajes con respecto a las longitudes iniciales, que se toman al día siguiente de la fabricación de las probetas, después de proceder a su desmolde.

Después de cada medida se examinan las probetas para determinar si existen fisuras o cualquier otro cambio en la superficie, como la formación de depósitos de gel.

Se considera que un árido es potencialmente reactivo si se obtiene una expansión superior al 0,04% en un año.



Figura 3.66. Medida de longitud de una probeta de hormigón

Cuando se producen expansiones es aconsejable realizar un análisis microscópico para identificar los productos de reacción y asegurar que dichas expansiones son debidas a la reacción árido-álcali, ya que la presencia de compuestos de azufre en los áridos o de óxidos de calcio y magnesio en los cementos y áridos pueden producir expansiones similares que pueden dar lugar a diagnósticos equivocados.

Además, el aporte externo de sodio impide estudiar cómo afecta la variación del contenido de álcalis del propio cemento al desarrollo de la reactividad de un árido concreto en estudio.

Resumiendo todo lo anterior se concluye que el método de los prismas de hormigón es muy fiable cuando se estudia la posible reactividad de un árido expuesto a medios con altas concentraciones de álcalis o a la respuesta de ciertas medidas preventivas, como el uso de adiciones o compuestos de litio. Sin embargo, este método no resulta apropiado para evaluar los posibles beneficios de otras medidas, como la disminución del contenido de álcalis de los cementos.

## **3.6. Técnicas instrumentales**

### **3.6.1. Introducción**

Las técnicas instrumentales que se incluyen a continuación se utilizan para obtener información que apoya o completa los resultados obtenidos a partir de las técnicas y ensayos específicos, desarrollados para el estudio y caracterización de los morteros y hormigones, que se recogen en la normativa española y europea preceptiva.

Estas técnicas son complejas, se realizan con equipos específicos y, en algunos casos, son de uso generalizado en el mundo de la investigación.

### **3.6.2. Estudio petrográfico**

El estudio petrográfico es el primer ensayo recomendado para evaluar la potencial reactividad de un árido pero, por lo general, no permite designar a un árido como reactivo o no.

Mediante esta técnica se pueden conocer los componentes de un agregado, su cuantía y distribución, su forma, su grado de erosión, la presencia de grietas, porosidades, etc.

La norma europea que describe la realización de este procedimiento es la UNE-EN 12407:2007, "Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico"<sup>110</sup>. Esta es una norma que incluye los procedimientos para ensayar todo tipo de piedra y conseguir un conocimiento exhaustivo de su composición.

La norma americana es más específica y dispone de una guía para la realización de exámenes petrográficos para áridos empleados en la fabricación de hormigón. Esta es la ASTM C 295<sup>111</sup> e incluye una relación de componentes minerales capaces de desarrollar reactividad cuando forman parte de los áridos en un hormigón.

La detección de estos minerales, así como su cuantía, forma y distribución en los áridos, permite una primera evaluación sobre la potencial reactividad álcali-árido y facilita la toma de decisiones sobre la necesidad de realizar ensayos específicos a los áridos en estudio.

### 3.6.3. Fluorescencia de rayos X

Mediante esta técnica se obtiene la composición química elemental de las muestras, tanto cualitativa como cuantitativa. Los elementos que se pueden detectar y cuantificar son los comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) y los resultados se presentan en % de los óxidos de los elementos presentes en la muestra.

El fundamento de esta técnica es la medida de la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X incidente o primaria.

La radiación X fluorescente o secundaria presenta longitudes de onda características para cada elemento e intensidades directamente relacionadas con la concentración del elemento en la muestra.

El equipo utilizado es un espectrómetro ARL ADVANT'XP Sequential XRF, de la casa Thermo Electron Corporation (Figura 3.67), con perladora Claisse Fluxy y prensa.

---

<sup>110</sup> UNE-EN 12407: 07, Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico, Asociación Española de Normalización y Certificación (2007).

<sup>111</sup> ASTM C295/C295M-12 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/C0295\_C0295-12.



Figura 3.67. Equipo de Fluorescencia de Rayos X ARL ADVAT XP.  
Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Burgos

#### 3.6.4. Difracción de rayos X

La Difracción de rayos X es una técnica que permite caracterizar todo tipo de material con estructura cristalina. Es una técnica no destructiva que permite la recuperación del material estudiado sin ningún tipo de deterioro.

Cuando un compuesto cristalino, que puede considerarse como una agrupación periódica y ordenada de átomos, es alcanzado por un haz de radiación cuya longitud de onda es de similar magnitud a la distancia interatómica, se produce la difusión del haz, dando lugar a diferentes tipos de interferencias que son constructivas en unas direcciones privilegiadas.

Así, la intensidad del haz difractado depende de la disposición geométrica de los átomos y de la clase de átomos presentes. Esto hace que cada sustancia cristalina presente su propio espectro de difracción y éste sea una auténtica “huella dactilar” del mismo, permitiendo su identificación y valoración cuantitativa en cualquier mezcla donde esté presente.

El equipo con el que cuenta la Universidad de Burgos para la realización de Difracción de Rayos X es un D8 Advance de diseño Davinci, fabricado por Bruker (Figura 3.68).

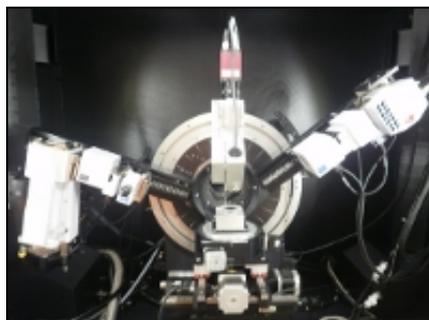


Figura 3.68. Equipo de Difracción de Rayos X modelo Bruker D8 Advance

Mediante esta técnica se pueden establecer las estructuras cristalinas presentes en el hormigón o mortero y estudiar la variación que sufren cuando estos materiales se someten a ensayos de reactividad. También se puede detectar la presencia de materia amorfa que evidencia una posible formación de geles.

### 3.6.5. Microscopía electrónica de barrido y espectrometría de dispersión de energía de rayos X

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope) utiliza un haz de electrones, acelerados en el cañón del aparato mediante un campo eléctrico, para impactar en la superficie de las muestras a estudiar. Como resultado de estos impactos se generan a su vez electrones procedentes de las muestras que, con los detectores adecuados, proporcionan una imagen que refleja las características superficiales de la muestra de la que proceden.

Las imágenes obtenidas mediante esta técnica tienen una gran resolución, entre 4 y 20 nm, por lo que se pueden hacer visibles muestras de pequeñísimo tamaño.

Al interaccionar el haz de electrones con la muestra también se generan rayos X cuya energía e intensidad es función del elemento atómico que los emite y de la concentración de este en la muestra. Teniendo en el equipo un detector adecuado se puede obtener información detallada sobre la composición elemental de zonas precisas de la muestra. A esta técnica se la denomina espectrometría de dispersión de rayos X o EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy).

La imagen de la Figura 3.69 corresponde al microscopio electrónico de barrido del Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Burgos, con el que se ha trabajado en esta tesis.

En el estudio de la reactividad de los áridos con los álcalis de los cementos se utiliza en gran medida la microscopía electrónica de barrido para observar de manera directa los geles expansivos producto de la reactividad y los daños producidos en las muestras estudiadas. Esto es especialmente importante en los métodos basados en la medición de expansividad de probetas de mortero u hormigón, ya que existen otros procesos, además de las reactividades álcali-árido, capaces de generar las expansiones.

Una vez localizados los posibles geles se analiza su composición mediante espectroscopía de dispersión de rayos X para certificar que son los productos buscados y conocer su composición exacta.



Figura 3.69. Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por Rayos X

### 3.6.6. Tomografía axial computarizada (TAC)

En el estudio de la reactividad álcali-árido, esta técnica permite observar internamente las probetas de mortero u hormigón que han sido sometidas a ensayos y han sido dañadas estructuralmente por los geles expansivos generados. Se pueden observar y estudiar, con gran detalle, fisuras y grietas o la distribución de las porosidades de las probetas. La información que aporta esta técnica permite conocer de manera más amplia y directa la generación y desarrollo de las fisuras y grietas para un mejor entendimiento de los procesos que las producen.

La tomografía axial computarizada, también conocida por las siglas TAC o por la denominación escáner, es una técnica que permite la obtención de un gran número de imágenes de cortes o secciones, transversales a un eje longitudinal, de una muestra a estudiar. Con las imágenes tomadas, una vez tratadas mediante un programa informático, se obtienen visualizaciones en tres dimensiones de las muestras, de tal manera que se puede observar y estudiar la estructura interior de éstas sin dañarlas.

La tecnología para la obtención de las imágenes se basa en los rayos X. El equipo de la Universidad de Burgos, con el que se ha trabajado, es un equipo de la marca YXLON, modelo CT Compact (Fig. 3.70). Consta de una cabina, que contiene una fuente de rayos, y una serie de detectores situados en un mismo plano horizontal. Entre ambos está la bancada en la que se coloca la

muestra que se quiere tomografiar. La bancada tiene movimiento ascendente y descendente y rotacional de tal manera que la muestra colocada en ella va a moverse verticalmente y a girar. De esta forma la muestra se va a situar entre la fuente de rayos X y los detectores y se va a mover transversalmente al plano en el que se sitúan éstos. La muestra se va a ver sometida a varios impactos de rayos X que darán distintas imágenes de un mismo plano debido a la rotación de la bancada. Como resultado se obtienen varias fotografías que, combinadas por un ordenador, darán lugar a la representación de un corte de la muestra como si fuera una rodaja. A medida que la bancada se mueve verticalmente se generan las imágenes de los cortes que, tratados con un programa informático, darán lugar a las imágenes en tres dimensiones.



Figura 3.70. Equipo de tomografía axial computarizada (TAC) YXLON. CT Compact. Universidad de Burgos

Las imágenes se procesan con el programa informático MIMICS, que separa las diferentes estructuras de la pieza en función de sus densidades. Así, los áridos, cuerpos más densos, aparecen en color más claro, la pasta de cemento, de densidad menor, aparece más oscurecida mientras que las grietas y los poros, en los que hay aire, aparecen de color negro. De esta forma se puede estudiar cómo se desarrollan las fisuras y que alcance tienen en el interior de la probeta.



## **Capítulo 4: Caracterización de materias primas**

---



## 4.1. Introducción

En este capítulo se describen las materias primas que se han utilizado para el desarrollo y optimización de los morteros con pizarra.

Después de una introducción de los materiales se incluyen los datos técnicos obtenidos a partir de los ensayos realizados o, en algunos casos, del propio fabricante de los materiales.

## 4.2. Cemento

Los cementos utilizados en el presente estudio se han escogido siguiendo criterios de idoneidad en cuanto a aspectos técnicos y de disponibilidad y coste de mercado en el hipotético caso de una futura fabricación a gran escala de los morteros diseñados.

En cuanto a las recomendaciones técnicas para los tipos de cementos usados en morteros se observan tres documentos que hacen referencia a ello.

- La NBE FL-90 “Muros resistentes de fábrica de ladrillo”, en su capítulo 3, tabla 3.1, de recomendaciones para el uso de cementos en morteros para muros de fábrica de ladrillo, analiza la aptitud de los distintos tipos de cemento para la fabricación de mortero y sugiere la utilización de los cementos de clase 35 o menor (según la denominación de los cementos incluida en la RC-88, vigente en el momento de la aparición de la norma) de los tipos I a IV, desaconsejando los de clase 45 o mayores.
- El Código Técnico de la Edificación, CTE; en su Documento Básico SE-F “Seguridad Estructural: Fábrica”<sup>112</sup> incluye, en el capítulo 3 titulado Durabilidad, la tabla 3.3 en la que se especifican las restricciones de uso de los componentes de las fábricas en función de las clases de exposición a las que se van a ver sometidos. Según dicha tabla los morteros que incluyen cementos tipo III o IV son utilizables sin restricciones en todas las clases de exposición excepto la Qb y Qc, en las que se establecen reservas para su uso. Los morteros de cementos tipo II se declaran utilizables en todas las clases pero con reservas en un gran número de ellas.

---

<sup>112</sup> Documento Básico SE-F “Seguridad Estructural: Fábrica. Código Técnico de la Edificación. R.D. 314/2006, de 17 de marzo. Ministerio de Fomento (2006).

La Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)<sup>113</sup> en su Anejo 8, que contiene las recomendaciones de uso de los distintos tipos de cemento, incluye la tabla A8.5 en la que se indica que los cementos aconsejables para la fabricación de mortero de albañilería son los cementos de albañilería y los comunes excepto los tipos I y II/A.

Según estas recomendaciones y teniendo en cuenta la disponibilidad de los cementos existentes en la zona de influencia geográfica, se han seleccionado los cementos CEM II/B-L 32,5 R y CEM IV/B (V) 32,5 N para los primeros diseños de morteros con pizarra.

#### 4.2.1. CEM II/B-L 32,5 R

El cemento Portland empleado es de tipo CEM II/B-L 32,5 R, de acuerdo a la norma EN 197-1, suministrado por la empresa Cementos Portland Valderrivas S.A. y fabricado en sus instalaciones de Hontoria de la Cantera, situadas en el término municipal de Venta de Baños (Palencia). Este cemento tiene la peculiaridad de incluir en su composición una cantidad importante de roca caliza, en torno a un 25%, lo que le confiere características propias en cuanto a tiempos de fraguado y adquisición de resistencias.

Los datos técnicos facilitados por la empresa Portland Valderrivas S.A. son los siguientes:

La Composición Nominal, declarada por el fabricante, se expresa en la tabla de la Figura 4.1.

Clinker	Puzolana	Ceniza	Escoria	Caliza	Esquisto	Humo	Comp. Min.
75	--	--	--	25	--	--	--

Figura 4.1. Composición nominal del CEM II/B-L 32,5 R, facilitada por Portland Valderrivas S.A.

<sup>113</sup> Instrucción para la recepción de cementos (RC-08). R.D. 956/2008, de 6 de junio. Ministerio de Fomento (2008).

Las características químicas, físicas y mecánicas se reflejan en la tabla de la Figura 4.2.

ENSAYOS		Valor Promedio
<b>Características Químicas</b>		
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	%	2,8
Cloruros	%	0,01
<b>Características Físicas y Mecánicas</b>		
Agua de Consistencia Normal	%	27,8
Principio de Fraguado	min	174
Final de Fraguado	min	228
Expansión Le Chatelier	mm	0,0
Superficie Específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	4225
Resistencia Mecánica a Compresión a 2 días	MPa	20,3
Resistencia Mecánica a Compresión a 28 días	MPa	47,2

Figura 4.2. Características técnicas del CEM II/B-L 32,5 R, facilitadas por la empresa Portland Valderrivas S.A. Período de agosto de 2010

Se ha realizado fluorescencia de rayos X a una muestra de este cemento obteniéndose la composición elemental que se muestra en la tabla de la Figura 4.3.

Componente	%	Componente	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	1,5	SiO <sub>2</sub>	15,8
MnO	0,03	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0
TiO <sub>2</sub>	0,13	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17
CaO	56,8	MgO	3,2
K <sub>2</sub> O	0,8	Na <sub>2</sub> O	0,0
		Perdida fuego	13,3

Figura 4.3. Composición elemental del CEM II/B-L 32,5 R, obtenida por fluorescencia de rayos X

### 4.2.2. CEM IV/B (V) 32,5 N

Para completar el estudio se ha utilizado cemento puzolánico del tipo CEM IV/B (V) 32,5 N, de acuerdo a la norma EN 197-1, suministrado y fabricado por Portland Valderrivas S.A. Este cemento incluye cenizas volantes de naturaleza silícea, en torno al 40%. Estas cenizas provienen de la quema de carbones pulverizados y presentan comportamiento puzolánico, ello provoca que estos cementos se caractericen por presentar tiempos de inicio y final de fraguado sensiblemente altos y una adquisición de resistencias más lenta en comparación con el cemento anterior. El cemento ha sido analizado mediante fluorescencia de rayos X para establecer exactamente su composición elemental.

Los resultados de los ensayos facilitados por la empresa Portland Valderrivas S.A. se presentan a continuación.

La Composición Nominal, declarada por el fabricante se expresa en la tabla de la Figura 4.4.

<b>Clinker</b>	<b>Puzolana</b>	<b>Ceniza</b>	<b>Escoria</b>	<b>Caliza</b>	<b>Esquisto</b>	<b>Humo</b>	<b>Comp. Min.</b>
56	--	41	--	--	--	--	3

Figura 4.4. Composición nominal del CEM IV/B (V) 32,5 N, facilitada por Portland Valderrivas S.A.

A continuación se recogen las características químicas, físicas y mecánicas de este cemento.

ENSAYOS		Valor Promedio
<b>Características Químicas</b>		
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	%	2,5
Cloruros	%	0,02
<b>Características Físicas y Mecánicas</b>		
Agua de Consistencia Normal	%	28,3
Principio de Fraguado	min	228
Final de Fraguado	min	317
Expansión Le Chatelier	mm	0,0
Superficie Específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	4230
Resistencia Mecánica a Compresión a 7 días (media acumulada 01/2011-12/2011)	MPa	28,2
Resistencia Mecánica a Compresión a 28 días (media acumulada 01/2011-12/2011)	MPa	44,9
Puzolanizidad		si

Figura 4.5. Características técnicas del CEM IV/B (V) 32,5 N, facilitadas por la empresa Portland Valderrivas S.A. Período de diciembre de 2011

Los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X realizado a este cemento se incluyen en la tabla de la Figura 4.6.

Componente	%	Componente	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	3,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,8
TiO <sub>2</sub>	0,37	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,50
CaO	41,7	MgO	2,5
K <sub>2</sub> O	1,6	Na <sub>2</sub> O	0,8
SiO <sub>2</sub>	30,3	Perdida fuego	5,7

Figura 4.6. Composición elemental del CEM IV/B (V) 32,5 N, obtenida por fluorescencia de rayos X

### 4.3. Agua

El agua utilizada es la que llega a la Escuela Politécnica Superior de Burgos y que suministra la empresa Aguas de Burgos S.A. Proviene de las estribaciones de la Sierra de la Demanda, perteneciente al Sistema Ibérico, y es acondicionada para su uso en la Estación de Tratamiento de Agua Potable de Arlanzón, desde donde se canaliza hasta la ciudad de Burgos.

El agua, una vez tratada para el consumo humano, es perfectamente adecuada para su uso en morteros, ya que no incorpora elementos alcalinos o sales en cantidades suficientes como para interferir en los procesos físico-químicos que tienen lugar en los morteros.

En la tabla de la Figura 4.7 se incluye un análisis de los principales parámetros que se controlan en el agua utilizada.

Parámetro	Valor (mg/L)	Parámetro	Valor (mg/L)
pH	8,86	Cloro libre	0,39
Turbidez	0,17	Cloro Total	0,45
Conductividad	47,70	Calcio	4,68
Amonio	0,01	Carbonatos	14,02
Hierro	0,06	Cloruros	1,77
Manganeso	0,00	Sulfatos	6,50
Aluminio	0,06		

Figura 4.7. Características del agua potable de la ciudad de Burgos. (Análisis facilitado por el Servicio de Aguas Municipal del Excmo. Ayuntamiento de Burgos)

### 4.4. Árido

Las arenas que se han utilizado para la confección de los morteros en el presente trabajo se preparan a partir de los residuos que se acumulan en las escombreras de la industria extractiva de la pizarra.

En este apartado se incluyen características de las pizarras como la base mineral de la que se obtiene el árido con el que se van a realizar los morteros, pero también se analizan las características de las composiciones finales de los áridos que se obtienen una vez que las pizarras han pasado por el proceso de preparación que se explica a continuación.

#### 4.4.1. Preparación de los áridos

Anteriormente se ha explicado el proceso de preparación de los áridos, desde que se recogen en las escombreras hasta que se guardan clasificados por tamaños. Este proceso incluye el machacado, tamizado, cribado y lavado de las muestras.

Para la realización de algunos ensayos es preciso utilizar el árido con la granulometría que se emplea en los morteros. Para ello se procede a pesar los diferentes porcentajes de cada uno de los tamaños necesarios para recomponer la arena, de esta forma se mantienen siempre las mismas características en cuanto a la cantidad y distribución de los distintos tamaños de grano que la forman (Figura 4.8).



Figura 4.8. Distintas fracciones de pizarra pesadas para recomponer la arena de mortero

#### 4.4.2. Ensayos y resultados de los áridos

Se han recogido y estudiado 7 variedades de pizarra de las que se trabajan en España y finalmente se han seleccionado dos tipos, de características y composiciones muy diferentes, para el estudio de las posibilidades que ofrecen estos materiales en la fabricación de morteros premezclados. A continuación se incluyen los ensayos realizados a las pizarras y a las arenas fabricadas con ellas.

##### 4.4.2.1. Estudio petrográfico

Se incluyen en este punto los estudios petrográficos de las siete muestras de pizarras, así como fotografías de las láminas delgadas vistas al microscopio, con detalles a destacar de cada una. El estudio ha sido realizado en el

Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEM) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), en Madrid, siguiendo la metodología de la norma UNE-EN 12407:2007.

### Pizarra 1

Se trata de una pizarra negra cuyo origen se encuentra en el noroeste de León, próximo a la localidad de Susaño del Sil, en la comarca del Bierzo, en León. La formación geológica forma parte de la Cordillera Cantábrica y sus orígenes se remontan a la era paleozoica, hace más de 200 millones de años. El estudio petrográfico que se presenta a continuación clasifica a esta pizarra como una filita con textura lenticular lepidoblástica (Figura 4.10) y estructura foliar. Su mineralogía muestra una composición de cuarzo, micas y clorita en distintos porcentajes, con la particularidad de incluir un alto porcentaje de opacos (óxidos de hierro, pirita y magnetita) y calcita, razón por la cual esta pizarra no se explota en la actualidad.

**Clasificación:** Filita.

**Textura:** Filítica lenticular lepidoblástica.

**Estructura:** Foliar.

**Mineralogía:** Cuarzo, sericita, moscovita, clorita, biotita, pirita, calcita, y rutilo.

Cuarzo: 20%, en granos de 0.05 mm en concentraciones irregulares en bandas y en lentículas en algunos casos asociado con piritas.

Sericita, moscovita y biotita: 60%, regularmente distribuidas en bandas.

Clorita: 15% fundamentalmente en lentículas lepidoblásticas de 0,2 mm dispuestas a modo de cordones con nudos siguiendo la foliación general.

**Minerales accesorios:** Calcita, opacos, y materia orgánica.

Calcita 1%, muy irregularmente distribuida en lentículas.

Opacos (óxidos de hierro, pirita y magnetita) 4%, asociados al cuarzo porfidoblástico lenticular.

Otros minerales accesorios: Rutilo y apatito.

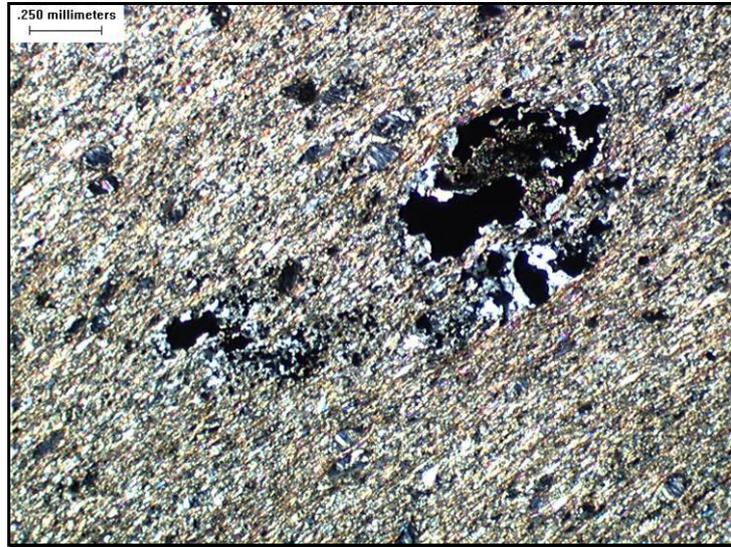


Figura 4.9. Piz 1. Opacos asociados a cuarzo. Luz polarizada (LP)

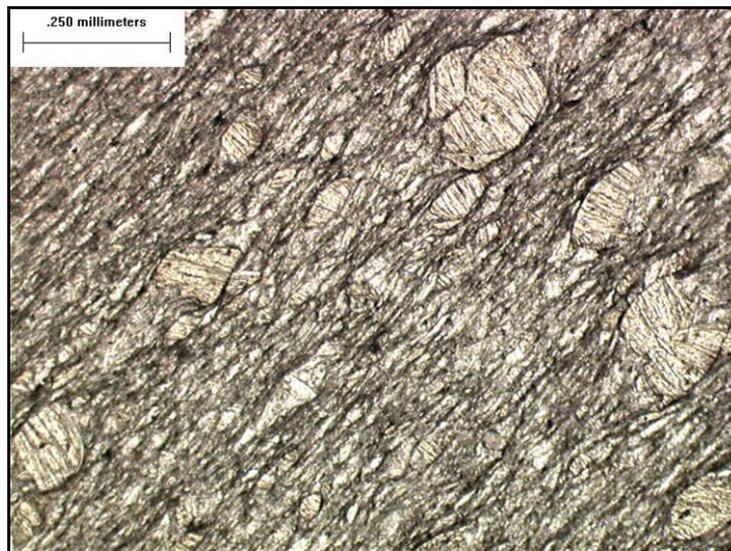


Figura 4.10. Piz 1. Lenticulas de clorita lepidoblástica. Luz normal (LN)

## Pizarra 2

Esta pizarra se ha recogido en plena zona de explotación de pizarras en la comarca de Valdeorras, en la provincia de Ourense, lindando con León. Se trata de una roca de origen paleozoico muy metamorfizada y enclavada en los Montes de León del Macizo Galaico-Leones. La pedanía más próxima al aprovechamiento es Riodolas, que pertenece al Ayuntamiento de Carballeda de Valdeorras.

Es una pizarra grisácea, con pocos óxidos pero con formaciones en pliegue en los planos de la pizarra y con aparición de vetas blancas de cuarzo en los tochos (Figura 4.11). Ambas circunstancias hacen que sea difícil el posterior despiezado, por lo que esta zona extractiva no se está trabajando.

Su descripción petrográfica se presenta a continuación:



Figura 4.11. Vetas de cuarzo en Pizarra 2

**Clasificación:** Micaesquisto con moscovita, clorita y biotita.

**Textura:** Esquistosa.

**Estructura:** Bandeada porfidoblástica.

**Mineralogía:** Cuarzo, moscovita, biotita, clorita, opacos y materia orgánica.

Cuarzo 35%, en porfidoblastos con huellas de presión y granos de entre 0,04 y 0,6 mm en bandeados discontinuos y en gruesas bandas de cristales con leve extinción ondulante.

Moscovita y biotita: 60% en microcristales alargados orientados.

Clorita: 2% en lenticulas de 0.2 mm con huellas de presión.

**Minerales accesorios:**

Opacos (*pirita y magnetita*) 3%, en cristales subidiomorfos de 0,15 mm regularmente distribuidos.

Otros minerales accesorios: *Materia orgánica y rutilo*.

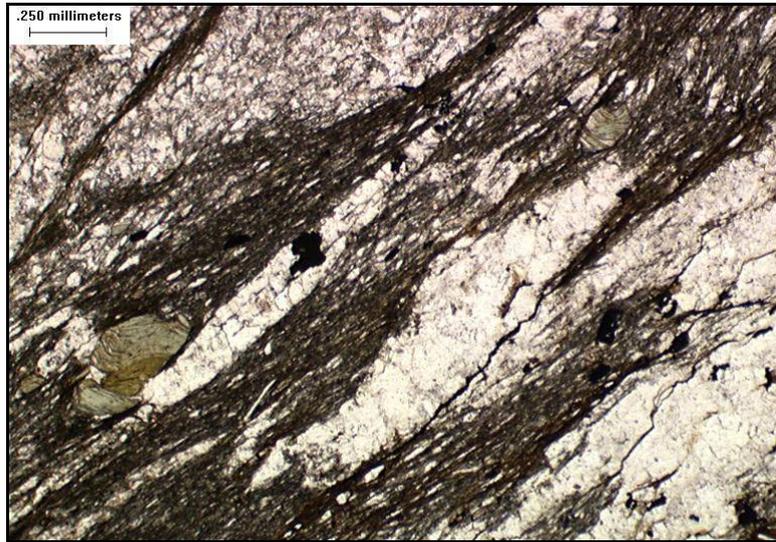


Figura 4.12. Piz 2. Porfidoblastos de cuarzo y clorita. LN

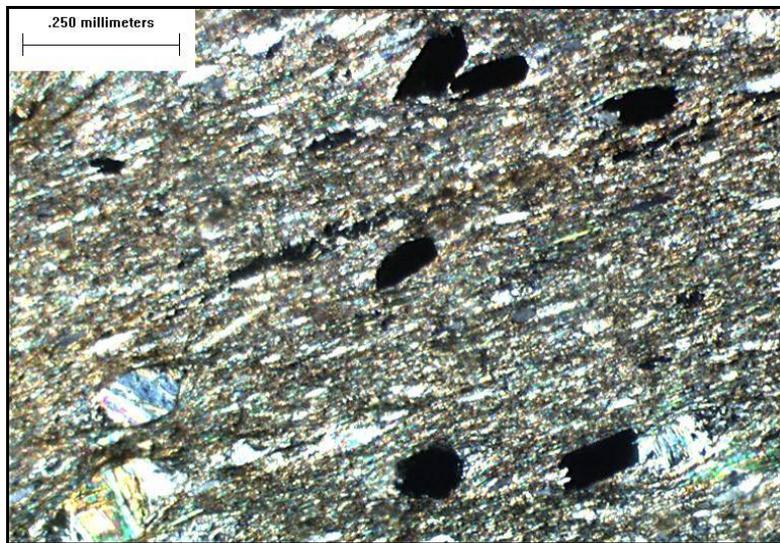


Figura 4.13. Piz 2. Magnetita y lenticulas de clorita. LP

### Pizarra 3

En la Figura 4.14 se muestra el lugar donde se ha recogido la denominada Pizarra 3, la salida de los rechazos de la planta en la que se transforman los tochos que llegan de la explotación. La cantera se sitúa en la misma zona que la pizarra 2 pero en diferente frente geológico. El término municipal al que pertenece dicha cantera es el de Puzmazán, en Ourense.



Figura 4.14. Rechazos de pizarra en la planta de transformación de la Pizarra 3

Es una pizarra negra con tonalidades grisáceas que se clasifica, en función de su estudio petrográfico, como una filita de textura lenticular lepidó y porfidoblástica y de estructura foliar.

**Clasificación:** Filita con moscovita, biotita y clorita.

**Textura:** Filítica lenticular lepidó y porfidoblástica.

**Estructura:** Foliar.

**Mineralogía:** Cuarzo, clorita, moscovita, sericita, biotita, opacos, circón, apatito y feldespato potásico.

**Cuarzo:** 30%, en porfidoblástos lenticulares de 0,25 mm orientados según la foliación, con sombras de presión cobijando minerales micáceos.

**Moscovita, sericita y biotita:** 65% en microcristales aciculares orientados regularmente distribuidos constituyendo la estructura foliar.

**Clorita:** 5% en porfidoblastos lenticulares de alteración de biotitas de 0.2 mm.

**Minerales accesorios:**

Opacos: hematites en agregados de cristales subhedrales.

Otros minerales accesorios: Circón, rutilo y apatito.

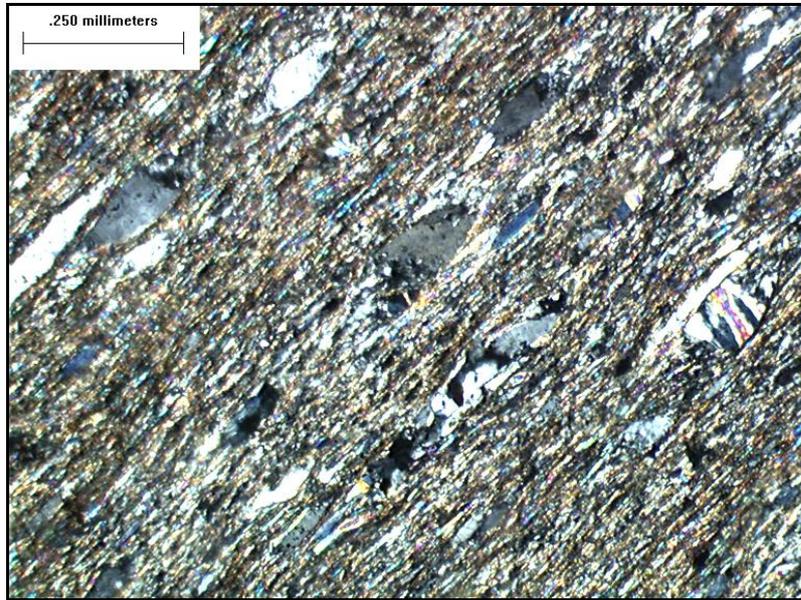


Figura 4.15. Piz 3. Lenticulas de cuarzo y clorita. LP

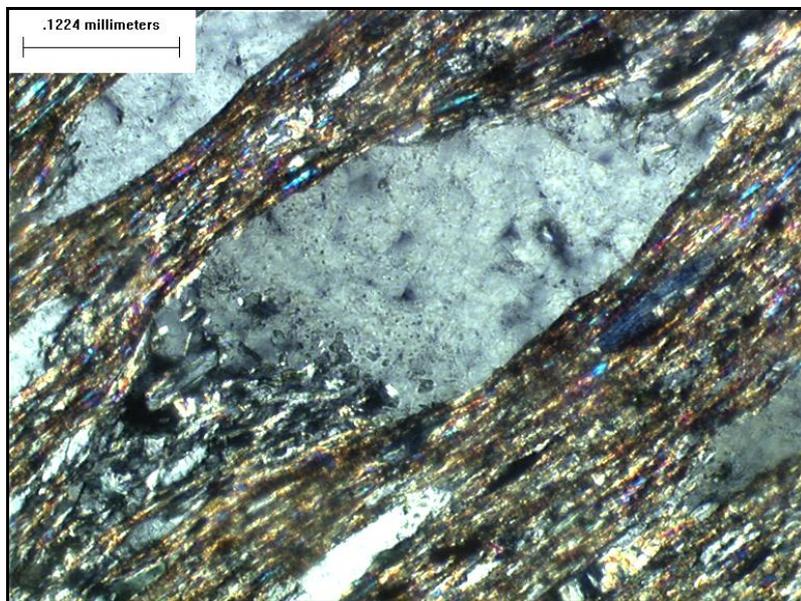


Figura 4.16. Piz 3. Sombras de presión en cuarzo lenticular. LP.

### Pizarra 4

Esta pizarra, de fuerte tonalidad verdosa, procede de una cantera situada al noroeste de Lugo, cerca de Lourixe, pedanía perteneciente al ayuntamiento de Pol. La zona es una altiplanicie que desciende gradualmente de Este a Oeste y en la que despuntan pequeñas cumbres que apenas superan los 650 metros. Las presiones ejercidas durante la Orogenia Herciniana en los depósitos de esquistos y cuarcitas existentes en la zona han propiciado la aparición de vetas pizarrosas que, debido a su composición mineralógica, toman su color verde característico (Figura 4.17).



Figura 4.17. Tonalidad verde de la pizarra 4 en arena compuesta de diferentes tamaños de grano.

**Clasificación:** Esquisto clorítico (esquisto verde).

**Textura:** Esquistosa de grano fino.

**Estructura:** Foliar.

**Mineralogía:** Cuarzo, clorita, moscovita, sericita, calcita, plagioclasa, pirita, y cloritoide.

**Cuarzo:** 30%, en granos y porfidoblastos de 0,1 mm orientados según la foliación.

**Moscovita y sericita:** 40% en laminillas orientadas constituyendo la estructura foliar.

**Clorita:** 28% en escamas y fibras de 0.05 mm regularmente repartidas dando el tono verdoso característico de esta roca.

**Minerales accesorios:** 2%.

**Opacos y pirita:** diseminados en cristales sueltos de 0,06 mm y en venas siguiendo la foliación.

Calcita: presente en las bandas más ricas en cuarzo en forma de granoblastos lenticulares y rellenando grietas.

Cloritoide: en porfiboblastos irregularmente repartidos.

Plagioclasa: repartida desigualmente en algunas bandas.

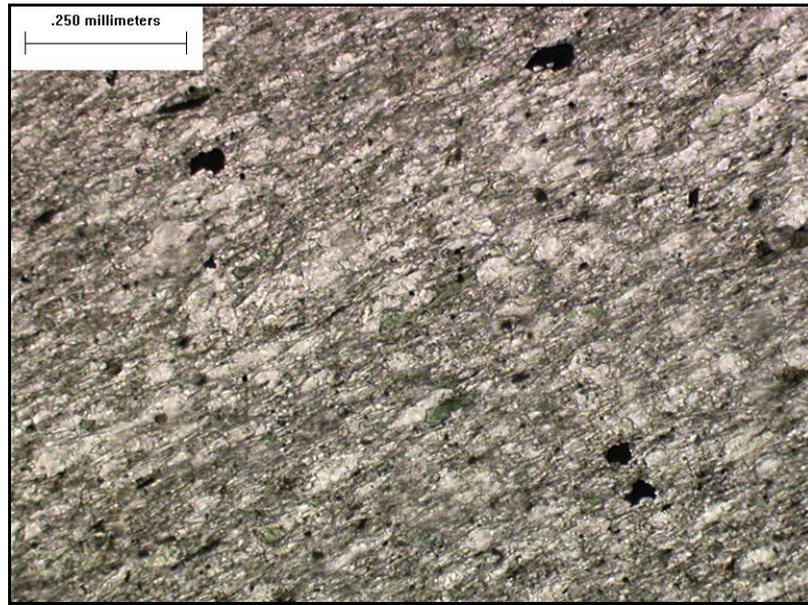


Figura 4.18. Piz 4. Esquist mostrando las cloritas verdes. LN



Figura 4.19. Piz 4. Calcita rellenando una grieta. LP

## Pizarra 5

Se trata de una pizarra negra que se encuentra próxima al pueblo de San Pedro de Trones, en el límite noroeste de León con Ourense, en los Montes de León.



Figura 4.20. Residuos de Pizarra 5 próximos al pueblo de San Pedro de Trones.

**Clasificación:** Filita.

**Textura:** Filítica de grano fino.

**Estructura:** Foliar.

**Mineralogía:** Cuarzo, moscovita, clorita, biotita, sericita, calcita, pirita y plagioclasa.

**Cuarzo:** 20% en lentículas orientadas de 0,02 mm y en menor medida en porfidoblastos.

**Moscovita, sericita y biotita:** 60% de microcristales fibrosos orientados.

**Clorita:** 19% en porfidoblastos lenticulares orientados de 0,1 mm.

**Calcita:** 1% en porfidoblastos de 0,15 mm regularmente distribuidos, alguno con textura helicítica.

**Minerales accesorios:**

Opacos (*pirita*) y *plagioclasa*.



Figura 4.21. Piz 5. Filita. LP

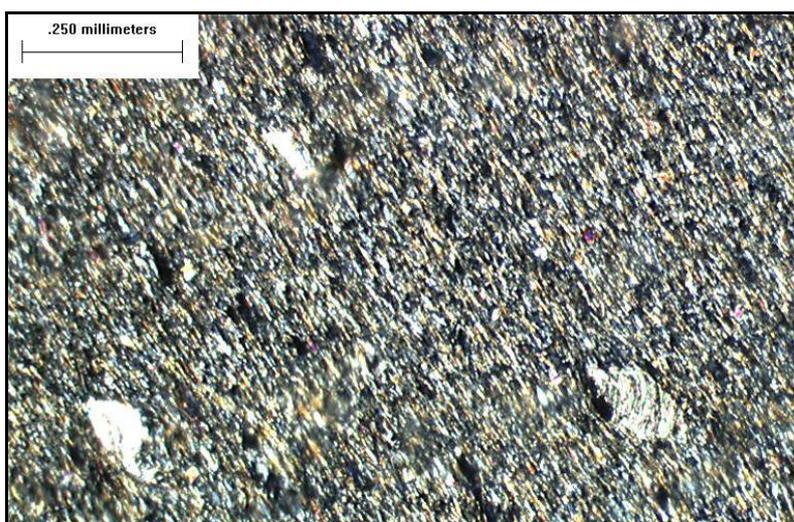


Figura 4.22. Piz 5. Porfidoblastos de calcita (alguna helicítica). LP

## Pizarra 6

La Pizarra 6 es una pizarra de color negro, extraída en el término municipal de Carballeda de Valdeorras, al este de Ourense limitando con la provincia de León. Se trata de otra zona extractiva de los Montes de León en el Macizo Galaico-Leones. La caracterización petrográfica se muestra a continuación.

**Clasificación:** Filita.

**Textura:** Filítica de grano fino.

**Estructura:** Foliar.

**Mineralogía:** Cuarzo, biotita, moscovita, clorita, pirita, andalucita, rutilo, apatito y albita.

Cuarzo: 10% en microcristales y lentículas orientadas.

Biotita y moscovita: 70% de microcristales fibrosos orientados.

Clorita: 18% en porfidoblastos lenticulares orientados de 0,12 mm.

**Minerales accesorios:** 2%

Pirita: en agregados y en lentículas.

Andalucita: en microcristales prismáticos que en algunos casos rompen la disposición foliar.

Rutilo: asociado a lentículas de cuarzo.

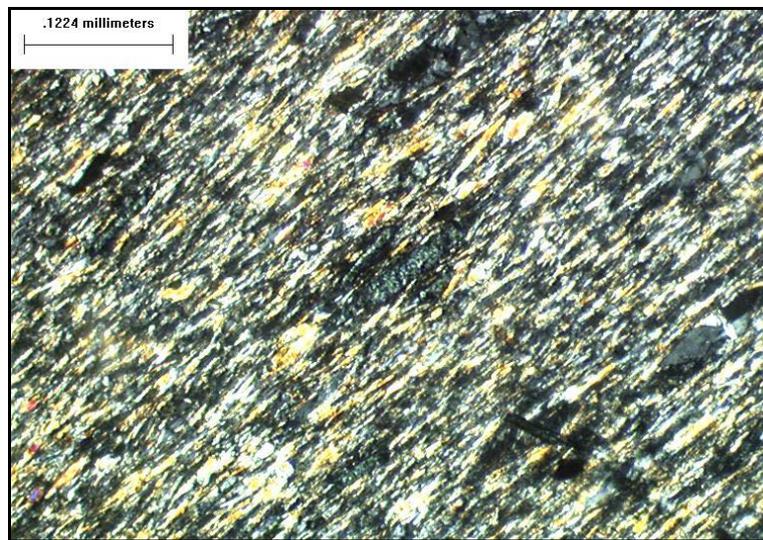


Figura 4.23. Piz 6. Filita con cristales de andalucita. LP

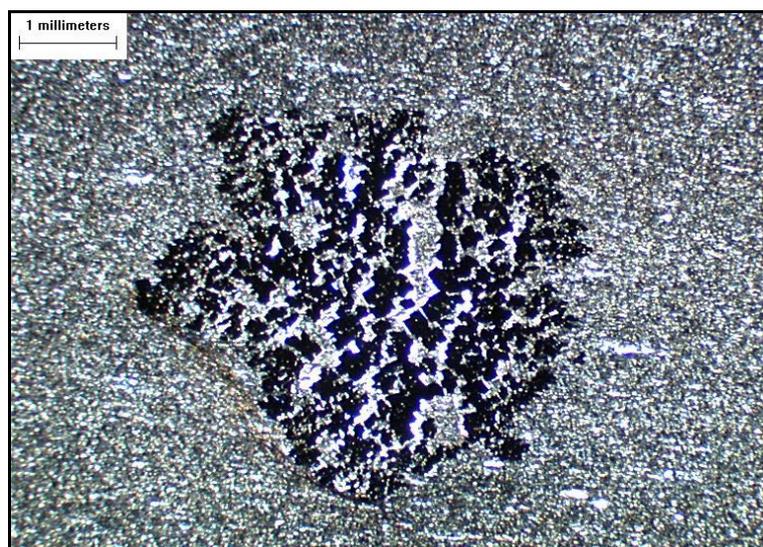


Figura 4.24. Piz 6. Agregado pirítico. LP

## Pizarra 7

Esta pizarra gris clara se ha recogido en el término de Bernardos, en la provincia de Segovia (Figura 4.25).

El enclavamiento geológico en el que se encuentra esta pizarra son las capas pertenecientes al complejo Esquisto-Grauwackico del Macizo de Santa María la Real de Nieva, que se formaron en el Precámbrico hacia el Cámbrico inferior y forman parte del Sistema Central.



Figura 4.25. Enclave de la cantera en la que se recoge la Pizarra 7

A continuación se incluye su descripción petrográfica:

**Clasificación:** Esquisto micáceo.

**Textura:** Esquistosa de grano fino.

**Estructura:** Foliar.

**Mineralogía:** Cuarzo, moscovita, biotita, clorita, opacos, calcita, cloritoide y apatito.

**Cuarzo:** 35% en granos de 0,05 mm en bandas.

**Moscovita:** 25% como microcristales alargados en bandas con concentraciones desiguales.

**Biotita:** 25% en cristales escamosos y alargados muchos de ellos cloritizados regularmente repartida.

**Clorita:** 12% regularmente repartida en cristales escamosos y en lentículas de 0,1 mm.

**Minerales accesorios:**

Opacos (*magnetita*): 2% en cristales de 0,02 mm distribuidos regularmente.

*Cloritoide, calcita y apatito*: 1%.



Figura 4.26. Piz 7. Esquisto micáceo. LP

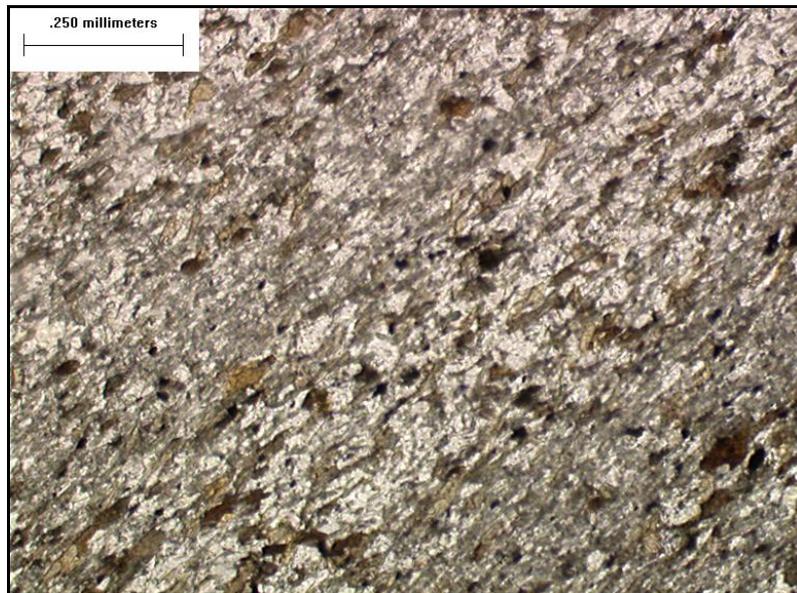


Figura 4.27. Piz 7. Biotitas cloritizadas. LN.

En la Tabla de la Figura 4.28 se resumen los principales datos obtenidos del estudio petrográfico.

	CLASIFICACIÓN	TEXTURA	CUARZO (%)	MICAS (%)	CLORITA (%)	OPACOS Y OTROS
PIZ-1	Filita	Filítica lenticular lepidoblástica	20	60 (Sericita, moscovita y biotita)	15	Pirita, magnetita Calcita
PIZ-2	Micaesquisto	Esquistosa	35	60 (Moscovita y biotita)	2	Pirita, magnetita Materia orgánica, rutilo
PIZ-3	Filita	Filítica lenticular lepid y porfidoblástica	30	65 (Moscovita, sericita y biotita)	5	Hematites Circón, rutilo, apatito
PIZ-4	Esquisto clorítico (verde)	Esquistosa de grano fino	30	40 (Moscovita y sericita)	28	Pirita Calcita Cloritoide Plagioclasa
PIZ-5	Filita	Filítica de grano fino	20	60 (Moscovita, sericita y biotita)	19	Pirita Calcita Plagioclasa
PIZ-6	Filita	Filítica de grano fino	10	70 (Biotita y moscovita)	18	Pirita Andalucita Rutilo
PIZ-7	Esquisto micáceo	Esquistosa de grano fino	35	50 (Moscovita, Biotita)	12	Magnetita Cloritoide, calcita y apatito

Figura 4.28. Tabla resumen del estudio petrográfico realizado a las 7 pizarras

#### 4.4.2.2. Fluorescencia de rayos X

En la Tabla de la Figura 4.29 se incluyen las composiciones elementales de las pizarras obtenidas mediante fluorescencia de rayos X, realizada en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid con un equipo Philips PW1480.

ELEMENTO (%)	PIZ-1	PIZ-2	PIZ-3	PIZ-4	PIZ-5	PIZ-6	PIZ-7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,00	6,70	8,00	7,00	9,30	9,60	6,90
MnO	0,05	0,08	0,08	0,08	0,07	0,09	0,10
TiO <sub>2</sub>	0,96	0,61	1,00	0,86	1,09	0,95	0,96
CaO	0,57	0,23	0,67	0,51	0,45	0,68	1,36
K <sub>2</sub> O	4,20	6,20	4,00	4,20	4,80	3,40	4,90
SiO <sub>2</sub>	60,30	60,30	59,20	61,70	53,10	53,40	61,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,60	22,10	19,80	18,30	23,10	22,80	18,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,16	0,17	0,22	0,18	0,26	0,15	0,11
MgO	1,80	1,60	2,40	2,80	2,90	2,10	2,80
Na <sub>2</sub> O	1,10	0,80	1,60	2,20	1,30	1,20	1,90

Figura 4.29. Composición elemental de las pizarras obtenida por fluorescencia de rayos X

#### 4.4.2.3. Difracción de rayos X

Los ensayos de difracción de rayos X también han sido realizados en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid. Para ello se ha empleado un equipo Phillips PW1830 y se obtienen difractogramas como el de la Figura 4.30.

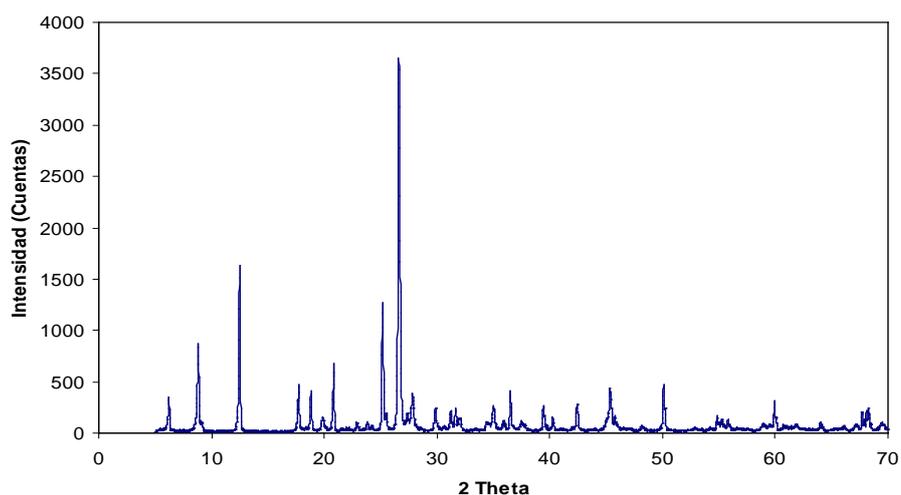


Figura 4.30. Difractograma de la Pizarra 1

Una vez estudiados los difractogramas se obtiene la composición mineralógica semicuantitativa de las pizarras. En la tabla de la Figura 4.31 se recogen estos resultados.

Estructura mineral	Fórmula	Piz 1	Piz 2	Piz 3	Piz 4	Piz 5	Piz 6	Piz 7
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	M	A	A	A	M	M	A
Clorita	(MgFe) <sub>5</sub> (AlSi) <sub>5</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	M	B	B	A	M	M	M
Moscovita	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	M	M	M	M	M	M	M
Feldespato de sodio (albita)	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	B	B	B	B	B	B	B
Feldespato de potasio	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	B	I	B	I	B	I	I

Concentración estimada: A = Alta; M = Media; B = Baja; I = Indicios

Figura 4.31. Composición mineralógica semicuantitativa de las pizarras obtenida mediante difracción de rayos X

#### 4.4.2.4. Densidad y absorción

Una vez compuesta la arena de cada pizarra con las distintas fracciones granulares se ha obtenido su densidad y absorción de acuerdo con la norma UNE-EN 1097-6: 2001, según se explica en el capítulo 3. Los resultados obtenidos se expresan en la Figura 4.32, a continuación.

	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)
PIZ 1	2830	0,22
PIZ 2	2710	0,20
PIZ 3	2770	0,18
PIZ 4	2750	0,36
PIZ 5	2750	0,34
PIZ 6	2740	0,20
PIZ 7	2770	0,23

Figura 4.32. Densidad de partículas y absorción de agua de las arenas obtenidas de las pizarras

#### 4.4.2.5. Friabilidad

Se ha determinado la resistencia a la fragmentación de las arenas obtenidas de las pizarras siguiendo la norma UNE 83-115-89. La metodología se puede consultar en el capítulo 3. Los coeficientes de friabilidad obtenidos se incluyen en la tabla de la Figura 4.33.

	PIZ 1	PIZ 2	PIZ 3	PIZ 4	PIZ 5	PIZ 6	PIZ 7
F.A.	19	46	21	56	18	20	41

Figura 4.33. Coeficientes de Friabilidad de las arenas obtenidas de las pizarras

#### 4.4.2.6. Cloruros solubles en agua

El contenido en cloruros solubles en agua se ha realizado según el método de Volhard, incluido en el capítulo 7 de la norma UNE-EN 1744-1: 2009. Este método se explica detalladamente en el capítulo 3 de este trabajo. Ninguna de las pizarras analizadas contiene cloruros solubles en agua.

#### 4.4.2.7. Sulfatos totales

Se ha realizado la determinación del contenido total en azufre siguiendo el método explicado en el capítulo 11 de la norma UNE-EN 1744: 1998. Los resultados obtenidos se expresan en la tabla de la Figura 4.34.

	PIZ 1	PIZ 2	PIZ 3	PIZ 4	PIZ 5	PIZ 6	PIZ 7
S (%)	0,36	0,22	0,12	0,11	0,12	0,19	0,14

Figura 4.34. Contenido total en azufre de las pizarras, expresado en % en masa

#### 4.4.2.8. Sulfatos solubles en ácido

El capítulo 12 de la norma UNE-EN 1744: 1998, detalla el método de determinación del contenido en sulfatos solubles en ácido en un ácido, que aquí se resume en el capítulo 3. Los resultados de este ensayo se reflejan en la tabla de la Figura 4.35.

	PIZ 1	PIZ 2	PIZ 3	PIZ 4	PIZ 5	PIZ 6	PIZ 7
SO <sub>3</sub> (%)	0,011	0,010	0,002	0,003	0,001	0,001	0,003

Figura 4.35. Sulfatos solubles en ácido en las pizarras, expresado como SO<sub>3</sub> (%)

#### 4.4.2.9. Reactividad árido-álcali

Como ya se ha señalado anteriormente y debido a su importancia, el estudio de la reactividad de los áridos generados a partir de las pizarras se desarrollará en gran profundidad más adelante en este trabajo. Después de un amplio número de ensayos se concluye que las pizarras se comportan como áridos reactivos frente a los álcalis de los cementos.

#### 4.4.2.10. Conclusiones en cuanto a la caracterización de los áridos

Para llevar a cabo esta caracterización se han tenido en cuenta dos consideraciones. En primer lugar se han caracterizado las pizarras como rocas minerales que son, para lo que se ha procedido a su descripción mineralógica y a la cuantificación de los elementos y estructuras mineralógicas que constituyen estas rocas. En segundo lugar se procede a analizar estos materiales en función del uso que se pretende hacer de ellos una vez procesados adecuadamente. En este caso se estudia la posible utilización de estas rocas como materiales de construcción formando parte de morteros u hormigones, más concretamente en las fracciones más pequeñas de los áridos constitutivos de estos materiales, es decir, las arenas.

En cuanto a la naturaleza de las pizarras, la descripción petrográfica y la difracción por rayos X nos muestran los minerales principales que las constituyen, como son cuarzo, micas y clorita. Estos minerales se presentan en proporciones y estructuras cristalinas diferentes en los distintos tipos de pizarra. Los minerales accesorios que presentan estas rocas son también característicos de cada una de ellas. La composición elemental resultado de la fluorescencia de rayos X presenta gran cantidad de silicio y aluminio, elementos componentes principales de los minerales más abundantes, una cantidad importante de hierro y potasio, que aparecen principalmente en clorita y micas respectivamente y cantidades menores de otros elementos como sodio, magnesio, etc.

El análisis de las arenas obtenidas por el procesado de las pizarras se ha realizado teniendo en cuenta las propiedades que debe cumplir un árido para ser utilizado en morteros, expresadas en la norma UNE-EN 13139: 2003 "Áridos para morteros" y los requisitos que debe cumplir un árido para ser utilizado en la fabricación de hormigón, explicados en el artículo 28 de la EHE-08 "Instrucción de Hormigón Estructural".

Algunos de los ensayos que aparecen en la normativa no han sido realizados en la presente Tesis Doctoral debido a diferentes consideraciones. Así, por ejemplo, no se estudia la granulometría, el contenido de finos o la calidad de estos ya que las arenas se componen a partir de fracciones granulométricas

de la roca previamente machacada, separada por tamaños y lavados estos. De esta forma, la granulometría queda establecida y permanece inalterable en todo momento y el contenido de finos se fija, y también permanece constante. La calidad de los finos es la de la propia pizarra con lo que no es necesaria la realización del equivalente de arena o el azul de metileno para verificar la presencia de arcillas. Del mismo modo no se realiza el estudio de materia orgánica o sustancias perjudiciales en las arenas ya que, por su procedencia, se descarta su existencia.

Los resultados indican que el material es de una densidad bastante elevada y una baja absorción.

Es de destacar la ausencia de cloruros, compuestos muy perjudiciales sobre todo en la fabricación de hormigones.

El contenido de compuestos totales de azufre de las arenas es muy bajo, en todos los casos mucho menor al 1% que es el límite establecido en la normativa para estos materiales. El contenido de sulfatos solubles en ácido es extremadamente bajo, muy inferior al límite establecido de 0,8%. Estos valores tan bajos en cuanto a sulfatos solubles en ácido hacen pensar que los compuestos de azufre que contienen las arenas corresponden a sulfuros, lo que se puede verificar en la descripción petrográfica de las pizarras, en la que observamos la presencia de piritas como compuestos minoritarios en muchas de ellas. La normativa nos previene de la existencia de pirrotina, que es la forma inestable del sulfuro de hierro, de tal forma que de detectarse ésta el límite del contenido de compuestos totales de azufre disminuye al 0,1%. En el caso de las pizarras no se detecta la presencia de este sulfuro inestable en ninguna de ellas. En el gráfico de la Figura 4.36 se observa la diferencia entre el contenido total de compuestos de azufre y el de sulfatos solubles en ácido expresados en % de  $\text{SO}_3$  en masa.

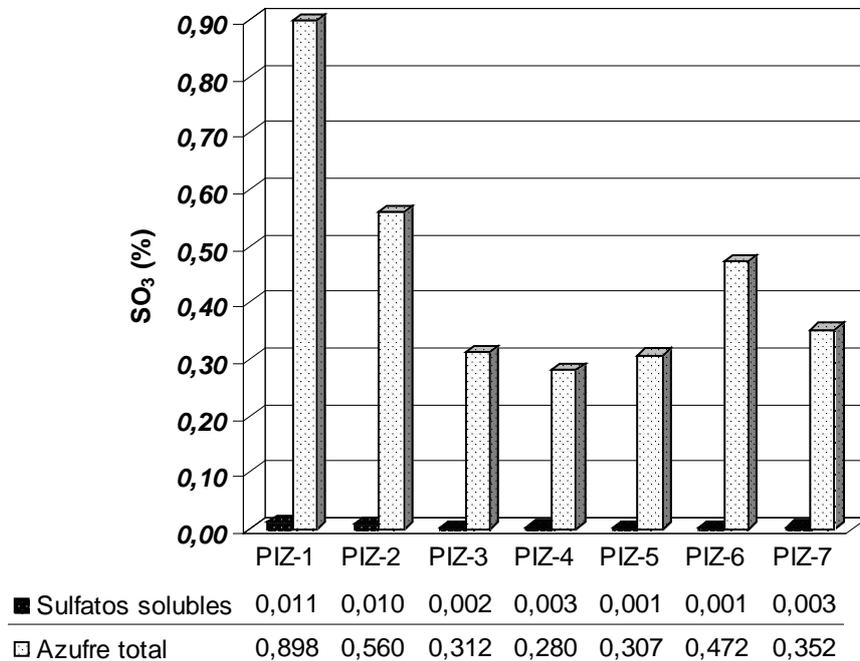


Figura 4.36. Contenido en azufre total y sulfatos solubles en las pizarras expresados como % SO<sub>3</sub> en masa.

#### 4.5. Aditivos

En este capítulo se recogen las características principales de los aditivos utilizados en esta Tesis Doctoral.

Se han empleado aditivos en estado sólido, en polvo, para poder ser añadidos al cemento y al árido y así conformar un mortero premezclado, al que tan solo se ha de añadir la cantidad de agua establecida y amasar el tiempo adecuado para obtener un mortero preparado para su aplicación.

Los aditivos que a continuación se describen se incluyen en distintos apartados atendiendo a la función principal que realizan en el mortero, pero se debe tener en cuenta que los aditivos suelen presentar efectos secundarios, que pueden ser o no beneficiosas para el material que se trabaja. Estos productos han sido utilizados en diferentes dosificaciones, con efectos de mejora muy positivos en algunos casos mientras que en otros casos su uso no resulta beneficioso, ya que no mejora el comportamiento del mortero y, en ocasiones, incluso lo empeora.

### 4.5.1. Cal

La cal se incluye en el apartado de los aditivos, ya que se utiliza en cantidades moderadamente bajas en relación con el peso de cemento, aunque estas cantidades son mucho mayores que las de los demás aditivos, y su inclusión se debe a la búsqueda de la mejora de propiedades del mortero y no a su calidad de conglomerante. En concreto se busca una mejora en la plasticidad y en la adherencia de los morteros dosificados.

#### 4.5.1.1. Cal aérea

La cal aérea es un conglomerante que solidifica y endurece solo en medios aéreos, ya que para ello precisa la presencia de dióxido de carbono. En esta investigación se ha utilizado cal aérea, denominada Hidróxido de Calcio CL 90-S, de acuerdo a la norma UNE-EN 459-1, de la casa Calcas de Castilla, S.A. (Calcasa), perteneciente al grupo Calcínor. El producto se recibe ensacado como se aprecia en la Figura 4.37.



Figura 4.37. Hidróxido de Calcio CL-90 S

El fabricante facilita los datos de la cal aérea que se incluyen en la tabla de la Figura 4.38.

Propiedad (UNE-EN 459-2)		Valor UNE-EN 459-1
CaO + MgO		≥ 90%
MgO		≤ 5%
CO <sub>2</sub>		≤ 4%
SO <sub>3</sub>		≤ 2%
Cal útil		≥ 80%
Tamaño de partículas	0,2 mm	≤ 2%
(% de rechazo en masa)	0,09 mm	≤ 7%
Estabilidad - Método de referencia		≤ 2 mm
Ensayos para morteros - Penetración		> 10 mm y < 50 mm
Ensayos para morteros - Contenido en aire		≤ 12%

Figura 4.38. Características del hidróxido de calcio CL 90 S

#### 4.5.1.2. Cal hidráulica natural

La cal hidráulica natural es un conglomerante a base de cal, que se obtiene calcinando calizas, que contienen entre un 15 y un 20% de arcilla, correctamente denominadas margas. Durante la cocción, con temperaturas por debajo de la clinquerización (aprox. 1200 °C), se forman silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio que confieren al ligante un carácter hidráulico, por lo cual es capaz de fraguar como el cemento y endurecerse incluso debajo del agua.

La cal hidráulica natural utilizada en este trabajo se denomina Cal Hidráulica Natural NHL-5, según la norma UNE-EN 459-1 y se importa de Italia, donde la produce Socii Italcementi Group. Sus propiedades se reflejan en la Figura 4.39.

Propiedad	Unidad	Valor medio
SO <sub>3</sub>	%	0,86
Cal libre	%	23,0
Finura a 90 μ	%	7,9
Finura a 200 μ	%	1,6
Expansión	mm	0,3
Densidad Aparente	Kg/dm <sup>3</sup>	0,820
Densidad Real	g/cm <sup>3</sup>	2,66
Valor Blaine	cm <sup>2</sup> /g	10071
Inicio de Fraguado	mn	400
Fin de Fraguado	mn	535
Resistencia a Compresión 7d	MPa	2,09
Resistencia a Compresión 28d	MPa	6,42

Figura 4.39. Características de la Cal Hidráulica Natural

En la Figura 4.40 se puede ver el producto ensacado con el que se ha trabajado.

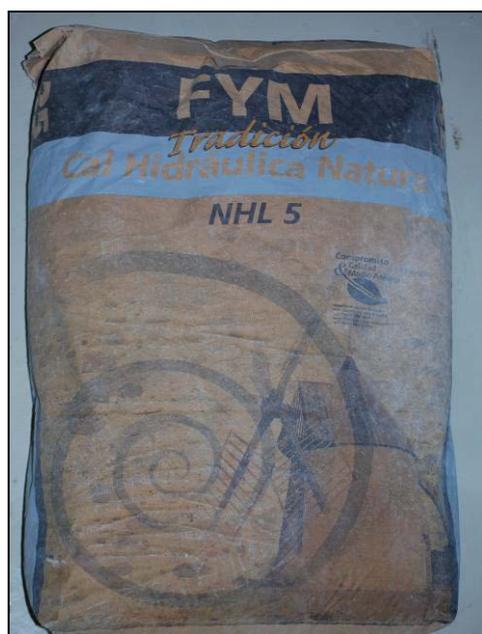


Figura 4.40. Cal Hidráulica Natural NHL-5

#### 4.5.2. Plastificantes-Aireantes

En este trabajo se han probado dos tipos de plastificante-aireante (en adelante aireante), el Premorter Mix 100 y el Premorter Mix 112, ambos aditivos en polvo de la empresa Copsa (Figura 4.41). En cuanto a su composición química el primero es un alquil-bencen-sulfonato de sodio mientras que el segundo es una mezcla entre el anterior sulfonato y lignosulfonato de sodio.

Su efecto principal es como plastificante-aireante, incluyendo en los morteros una cantidad limitada de aire en forma de microburbujas que se reparten homogéneamente por la masa. Se consigue así mejorar la trabajabilidad del mortero, sobre todo si las arenas son ásperas o de mala calidad, como las pizarras utilizadas en el presente trabajo. Esto es debido a la disminución de rozamiento entre las partículas del mortero, por el efecto lubricante que producen las microburbujas situadas entre ellas.

A consecuencia de la introducción de aire se consigue también aligerar la masa así como reducir la cantidad de agua de amasado, ya que las microburbujas permiten obtener la misma consistencia del mortero con una cantidad menor de agua.



Figura 4.41. Aditivos aireantes en polvo

Otro efecto positivo del uso de estos aireantes es el aumento de la resistencia del mortero endurecido a las heladas y a la intemperie, ya que las microburbujas de aire rompen la red capilar que se crea en los morteros debido a la salida del agua de amasado sobrante en el proceso de fraguado y endurecimiento.

El efecto negativo que producen los aireantes es el progresivo descenso de resistencias a medida que la cantidad de aire ocluido en la masa aumenta.

En la tabla de la Figura 4.42 se incluyen los datos técnicos de los aireantes utilizados en este trabajo, extraídos de las fichas técnicas del Grupo Copsa.

	PREMORTER MIX 100	PREMORTER MIX 112
ASPECTO	Polvo	Polvo
COLOR	Blanco	Beige
DENSIDAD	1,15 g/cm <sup>3</sup> ±0,3	0,70 g/cm <sup>3</sup> ±0,3
CONTENIDO EN CLORUROS	Exento	Exento

Figura 4.42. Características técnicas de los aireantes

### 4.5.3. Superplastificante

El Prewflow 1000 P es un superplastificante en polvo de base polimérica de la casa Copsa (Figura 4.45). Químicamente se puede definir como un formaldehído sulfonado modificado. Su efecto de dispersión de las partículas de cemento facilita una más rápida y efectiva hidratación de este, aumentando su rendimiento. Esto permite reducir la cantidad de agua necesaria para obtener un mortero de una consistencia establecida.

Como consecuencia de la reducción en el agua de amasado se consigue mejorar características como las resistencias mecánicas, que aumentan considerablemente, obteniendo un mortero con buena cohesión y homogeneidad.

El superplastificante utilizado tiene las características mostradas en la tabla de la Figura 4.43.

	PREFLOW 1000 P
TIPO	Naftaleno, Formaldehído sulfonado modificado
ASPECTO	Polvo
COLOR	Marrón claro
DENSIDAD	0,93 g/cm <sup>3</sup> ±0,3
CONTENIDO EN CLORUROS	Exento

Figura 4.43. Características técnicas del superplastificante

### 4.5.4. Plastificante

El plastificante en polvo, utilizado en esta tesis, ha sido el Premorter Mix 201, también de la empresa Copsa (Figura 4.46.). El principio activo de este aditivo es una mezcla de alquil-bencen-sulfonato de sodio y un derivado de celulosa modificado, y actúa como retenedor del agua de amasado y a su vez como plastificante del mortero, aumentando su cohesión y su trabajabilidad, reduciendo parte del agua de amasado y mejorando las propiedades del mortero, tanto en resistencia como en durabilidad.

En la Figura 4.44 se muestran los datos técnicos del plastificante utilizado, facilitados por el fabricante.

PREMORTER MIX 201	
ASPECTO	Polvo
COLOR	Marrón
DENSIDAD	0,9 g/cm <sup>3</sup> ±2%
CONTENIDO EN CLORUROS	<0,1%

Figura 4.44. Características técnicas del plastificante

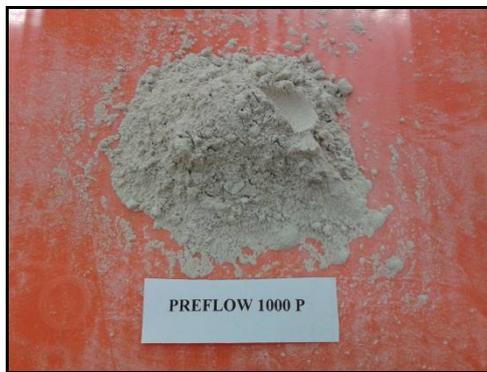


Figura 4.45. Aditivo superplastificante



Figura 4.46. Aditivo plastificante

#### 4.5.5. Retenedor de agua

El Cimsil C22 es el aditivo en polvo que se ilustra en la Figura 4.48. Está constituido por polímeros hidrosolubles y silicatos inorgánicos derivados de la sepiolita, es dispersable en agua y genera en la matriz del mortero una red tridimensional, modificando la reología del mismo. Su base inorgánica de gran superficie específica está recubierta, además, por un elevado número de centros activos, los cuales fijan las moléculas del componente orgánico del Cimsil C22. Esta combinación entre ambos componentes aporta un gran poder de retención de agua y el carácter tixotrópico a la matriz. Esta red mixta está formada por pequeñísimas partículas aciculares y cadenas poliméricas con gran número de hidroxilos, lo que favorece las uniones mortero-soporte-recubrimiento dando lugar a transferencias por medio de microanclajes de carácter físico y químico. Proporciona, por tanto, una gran adherencia del mortero al soporte.

En la tabla de la Figura 4.47 se recogen las principales características del retenedor de agua empleado facilitadas por el grupo Copsa.

	<b>CIMSIL C22</b>
<b>TIPO</b>	Silicatos modificados
<b>ASPECTO</b>	Polvo
<b>COLOR</b>	Blanco o tostado
<b>DENSIDAD</b>	0,48 g/cm <sup>3</sup> ±2%
<b>CONTENIDO EN CLORUROS</b>	Exento

Figura 4.47. Características técnicas del retenedor de agua

#### 4.5.6. Polímeros dispersables

Para incrementar la adherencia se han probado polímeros dispersables de la marca Vinnapas, de la empresa Wacker Chemie AG (Figura 4.49). Estos polímeros son polvos que al amasarse con agua se dispersan y forman una red de resina o películas poliméricas que, una vez el mortero ha endurecido se vuelven insolubles al agua y mejoran significativamente la adherencia a los soportes más diversos. Concretamente se han utilizado el Vinnapas 5010 N, un polímero compuesto de acetato de vinilo y etileno, y Vinnapas 7031 H, que es un terpolímero de etileno, laurato de vinilo y cloruro de vinilo.

Estos aditivos, además de mejorar la adherencia, prometen múltiples efectos positivos para el mortero como pueden ser mejor cohesión, y por ende mejores resistencias mecánicas, una permeabilidad al vapor adecuada y comportamiento hidrófobo en el caso del polímero Vinnapas 7031 H.

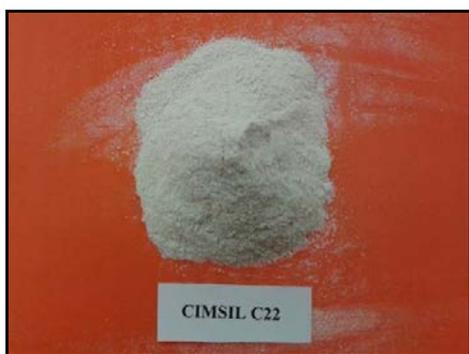


Figura 4.48. Aditivo retenedor de agua



Figura 4.49. Aditivos mejoradores de adherencia

Las características principales de los polímeros dispersables se presentan en la tabla de la Figura 4.50, en la que se incluyen los datos facilitados por el fabricante Wacker Chemie AG.

	<b>VINNAPAS 5010 N</b>	<b>VINNAPAS 7031 H</b>
<b>TIPO</b>	polímero compuesto de acetato de vinilo y etileno	terpolímero de etileno, laurato de vinilo y cloruro de vinilo
<b>ASPECTO</b>	Polvo	Polvo
<b>COLOR</b>	Blanco amarillento	Blanco
<b>TAMAÑO DE PARTÍCULA</b>	Max 4% mayor de 400 $\mu\text{m}$	Max 4% mayor de 400 $\mu\text{m}$
<b>DENSIDAD APARENTE</b>	490 - 590 $\text{Kg/m}^3$	400 - 550 $\text{Kg/m}^3$
<b>CONTENIDO EN SÓLIDOS</b>	98 - 100%	98 - 100%
<b>CONTENIDO EN CENIZAS</b>	9 - 13%	7,5 - 11,5%

Figura 4.50. Características técnicas de los polímeros dispersables



## **Capítulo 5: Diseño de morteros con pizarra. Dosificaciones iniciales**



## 5.1. Introducción

El objetivo principal de la presente Tesis es el diseño de morteros de albañilería y de revoco y enlucido utilizando pizarras como árido, de tal manera que se alcancen baremos de calidad comparables a los morteros disponibles en el mercado en cuanto a sus características. De esta forma, el aprovechamiento de los rechazos de cantera de pizarra para la fabricación de mortero podría ser considerado como una de las salidas viables para estos residuos, que permanecen acopiados en las escombreras próximas a las explotaciones.

Teniendo en cuenta las normas de especificaciones de morteros de albañilería y de revoco y enlucido, UNE-EN 998-1<sup>114</sup> y UNE-EN 998-2<sup>115</sup> respectivamente, los morteros que se pretenden obtener se definirían como morteros diseñados secos, hechos en fábrica, para uso corriente.

El concepto de morteros diseñados hace referencia a que su composición y sistema de fabricación es elegido por el fabricante para obtener las propiedades especificadas (concepto de prestación). En este sentido se tomarán las características de los morteros de este tipo existentes en el mercado, como referencia en cuanto a las propiedades que se quieren alcanzar en los morteros de pizarra. No se ha encontrado ningún mortero comercial que cuente con arenas de naturaleza pizarrosa en su composición. La condición de morteros secos hechos en fábrica se refiere a que el mortero se dosifica y mezcla en fábrica, y solamente requeriría de la adición de agua para proceder al amasado en la obra. Esto implica que los aditivos incluidos en los morteros han de ser en polvo, lo que limita las posibilidades de selección de éstos para las modificaciones que se necesiten realizar en los morteros que se pretenden diseñar.

El concepto de morteros para uso corriente engloba a morteros de albañilería o de revoco/enlucido sin características especiales adicionales, de aplicación en la generalidad de los trabajos de rejuntado de albañilería o de revestimiento de exteriores o interiores.

---

<sup>114</sup> UNE-EN 998-1: 2010, Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2010).

<sup>115</sup> UNE-EN 998-2: 2003, Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).

En este capítulo y los sucesivos se detallan, de principio a fin, los pasos que se han seguido para la consecución de morteros con pizarra de características adecuadas para su utilización en el sector de la construcción y se procede a la caracterización de las dosificaciones con mejores cualidades para su hipotética comercialización.

## **5.2. Diseño preliminar de morteros con pizarra**

En primer lugar se obtienen los morteros básicos, sin aditivos, que servirán de base o referencia, y se lleva a cabo su estudio para obtener sus características principales y evaluar las posibles mejoras en caso de ser necesarias.

### **5.2.1. Selección de la curva granulométrica**

Teniendo en cuenta que las arenas se van a obtener mediante machaqueo de los grandes fragmentos de pizarra recogidos directamente en las escombreras, el primer paso necesario para el diseño de los morteros es establecer una granulometría específica, que en este caso se va a conseguir a partir de la separación por tamaños de las rocas machacadas y la posterior reagrupación de las cantidades adecuadas de cada tamaño.

Para fijar la curva granulométrica con la que se va a trabajar en este estudio se toma como referencia la Norma Básica de la Edificación NBE FL-90 “Muros resistentes de fábrica de ladrillo”<sup>116</sup>, vigente hasta la aparición del CTE, “Código Técnico de la Edificación”. En ella se especifican las condiciones que debe cumplir la granulometría del árido en un mortero de albañilería. La curva debe estar comprendida en el huso granulométrico establecido y además se deben cumplir ciertas proporciones entre las cantidades de árido de los distintos tamaños que componen la muestra.

En la Figura 5.1 se incluye la curva granulométrica seleccionada para los morteros de pizarra así como el huso granulométrico que establece la Norma Básica de la Edificación, NBE FL-90.

También se incluye el huso granulométrico que establece la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08<sup>117</sup>, en su artículo 28.3.3, para el árido fino utilizado en la fabricación de hormigón.

---

<sup>116</sup> NBE FL-90 «Muros resistentes de fábrica de ladrillo». R.D. 1723/1990, de 20 de diciembre. C.M. DGAV. Servicio de Normativa Técnica, Supervisión y Control (2004).

<sup>117</sup> EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento, 4ª edición (2010).

Se observa que la curva granulométrica de la arena de pizarra está comprendida dentro de ambos husos, lo que permitiría la utilización de ésta para la fabricación de ambos materiales en cuanto a su granulometría, ampliando de forma importante sus posibilidades de aprovechamiento.

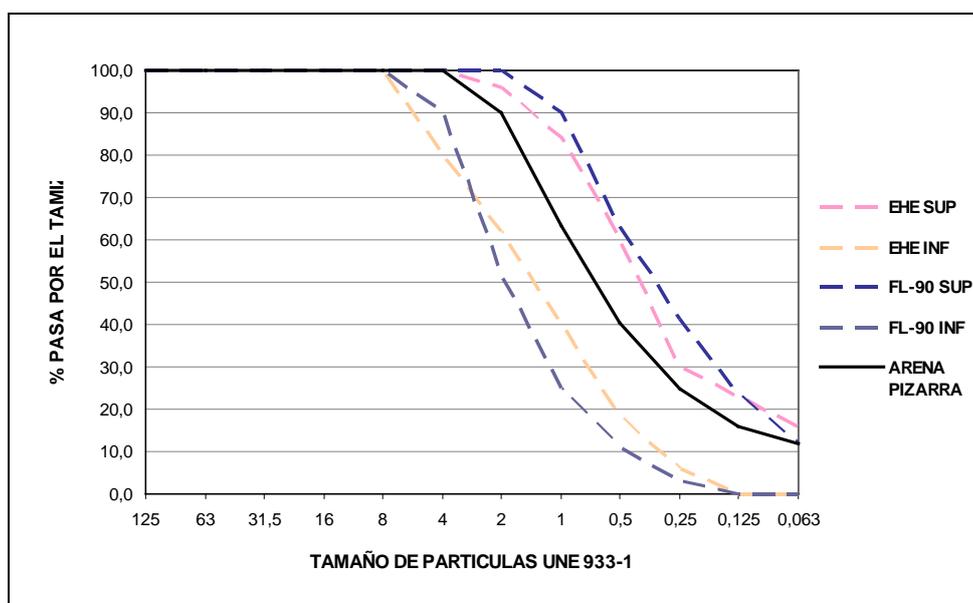


Figura 5.1. Curva granulométrica para morteros de pizarra y husos granulométricos incluidos en la FL-90 y en la EHE-08

A partir de la granulometría especificada se obtienen los porcentajes de los diferentes tamaños de pizarra con los que se recompone el árido fino para los morteros. Estos porcentajes se incluyen en la Figura 5.2.

Tamiz	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	PASA
%	0	0,1	9,9	26,5	23,2	15,2	9,0	4,0	12,0

Figura 5.2. Porcentajes de los diferentes tamaños de árido fino para la arena de mortero.

Como se puede advertir en el gráfico y en la tabla se establece un alto porcentaje de material que pasa por el tamiz de 0,063 mm. Esto se debe a que la pizarra se va a someter a un machaqueo que va a generar una alta proporción de polvo menor de este tamaño. Estos finos se intentan incluir en la mayor cuantía para aprovechar la mayor cantidad de residuo mineral posible.

### 5.2.2. Pizarras utilizadas para el diseño de morteros

De las siete pizarras que se han caracterizado se seleccionan dos para el diseño de morteros. Esto se debe a la necesidad de acotar el trabajo experimental y a la redundancia que supondría la repetición de ensayos con materiales de similares características. De esta forma se escogen las Pizarras 1 y 4 por los motivos que se enumeran a continuación:

- El estudio petrográfico llevado a cabo a las pizarras las clasifica como filita a la primera y esquisto clorítico a la segunda, lo que indica un distinto grado de metamorfismo entre las dos. Sus texturas son muy diferentes entre sí, así como sus composiciones minerales.
- En cuanto a sus características físicas, sus densidades y absorciones son muy distintas, siendo la Pizarra 1 muy densa y de las que menos absorción de agua presenta. La Pizarra 4, por su parte, tiene una densidad media-baja y una alta absorción de agua.

La resistencia a la fragmentación de ambas también es muy diferente, siendo la Pizarra 1 bastante resistente, mientras que la 4 presenta la friabilidad más alta de todas las pizarras con amplia diferencia.

- El contenido en sulfatos es el mayor de todas las pizarras en el caso de la Pizarra 1, mientras que la Pizarra 4 muestra un valor de los más bajos.
- En cuanto a la reactividad que presentan las pizarras con los álcalis de los cementos, la Pizarra 1 es de las que ha demostrado mayor reactividad mientras que la Pizarra 4 está entre las que se muestran menos reactivas.
- Ambos residuos son accesibles para su recogida en las cantidades necesarias para la realización de los ensayos.

### 5.2.3. Dosificación de los morteros iniciales

La primera cuestión a abordar a la hora de dosificar las mezclas es la relación adecuada entre los principales componentes del mortero: El cemento, la arena y el agua. Para ello es necesario especificar las características principales de los materiales que se quieren conseguir y hacia los que se encaminaran los esfuerzos en el diseño.

#### 5.2.3.1. Consideraciones técnicas

Las normas UNE-EN 998-1 y 2 incluyen las especificaciones que deben cumplir los morteros para revoco y enlucido y para albañilería respectivamente, y en ambos casos queda patente que uno de los principales requisitos para éstos morteros es la resistencia a compresión.

En el caso de los morteros de revoco y enlucido la norma UNE-EN 998-1 incluye la Tabla de la Figura 5.3, en la que se clasifican estos morteros en función de su resistencia a compresión, su absorción de agua por capilaridad y su conductividad térmica.

PROPIEDADES	CATEGORÍAS	VALORES
Intervalo de resistencia a compresión a 28 días	CS I	0,4 N/mm <sup>2</sup> a 2,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS II	1,5 N/mm <sup>2</sup> a 5 N/mm <sup>2</sup>
	CS III	3,5 N/mm <sup>2</sup> a 7 N/mm <sup>2</sup>
	CS IV	≥ 6 N/mm <sup>2</sup>
Absorción de agua por capilaridad	W 0	No especificado
	W 1	$C \leq 0,40 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W 2	$C \leq 0,20 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Conductividad térmica	T 1	≤ 0,1 W/m*K
	T 2	≤ 0,2 W/m*K

Figura 5.3. Clasificación de las propiedades del mortero endurecido de la UNE-EN 998-1

La norma UNE-EN 998-2 incluye la Tabla 1, en la que clasifica los morteros en función de su resistencia a compresión en 7 categorías (Figura 5.4).

CLASE	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	Md
Resistencia compresión (MPa)	1	2,5	5	10	15	20	d
d es una resistencia a compresión mayor de 25 N/mm <sup>2</sup> declarada por el fabricante.							

Figura 5.4. Clases de mortero de la UNE-EN 998-2

Sin embargo, en cuanto a las materias primas utilizadas para obtener estos morteros, la normativa indica que “Las características de las materias primas deben permitir obtener un producto terminado conforme con los requisitos de esta norma”, sin especificar requisitos que deban cumplir los cementos o arenas utilizadas para la fabricación del mortero.

Existen varios textos técnicos que orientan sobre las proporciones adecuadas para los morteros en cuanto a sus componentes en función de los usos de éstos o de las resistencias que se quieran alcanzar. Cabe citar las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), editadas en los años 70 con categoría

de soluciones técnicas recomendables, en las que, en sus subfamilias de estructuras de fábrica de bloques o ladrillos, fachadas de éstas mismas fábricas y particiones de tabiques de ladrillo, recomiendan el tipo de mortero de agarre idóneo siendo, en muchos casos un mortero M-40 de dosificación 1:6 de cemento:arena. En lo que respecta a los revestimientos de paramentos, las tecnologías de revocos y enfoscados también incluyen consideraciones sobre las proporciones idóneas de los componentes de los morteros dando varias posibilidades en cuando a las dosificaciones.

La NBE FL-90 de muros resistentes de fábrica de ladrillo, hace referencia a las resistencias mínimas de los morteros estableciendo dosificaciones recomendadas para la consecución de estas resistencias. En la Figura 5.5 se incluye un resumen de estas dosificaciones.

MORTERO TIPO	RESISTENCIA Kg/cm <sup>2</sup>	DOSIFICACIÓN (partes en volumen)			
		cemento	cal aérea	cal hidráulica	arena
M-20	20	1			8
		1	2		10
				1	3
M-40	40	1			6
		1	1		7
M-80	80	1			4
		1	1/2		4
M-160	160	1			3
		1	1/4		3

Figura 5.5. Morteros tipo y sus dosificaciones. NBE-FL. 90

Por último, el Documento Básico SE-F “Seguridad Estructural: Fábrica” del actual Código Técnico de la Edificación incluye las resistencias características a compresión de las fábricas usuales, en la que se recogen también las resistencias mínimas de los morteros de juntas en dichas fábricas (Figura. 5.6).

Resistencia normalizada piezas, fb (N/mm <sup>2</sup> )	5		10		15		20		25
Resistencia mortero, fm (N/mm <sup>2</sup> )	2,5	3,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	-	3	3	3	3	3	3	3
Ladrillo macizo	2	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	2	4	4	5	6	7	8	9
Bloques aligerados	2	2	3	4	5	5	6	7	8
Bloques huecos	1	1	2	3	4	4	5	6	6

Figura 5.6. Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales  $f_k$  (N/mm<sup>2</sup>). Incluye las resistencias a compresión del mortero recomendadas. DB SE-F del CTE.

Teniendo en cuenta toda la información recogida hasta aquí se establece una resistencia mínima a compresión para los morteros de pizarra de 7,5 N/mm<sup>2</sup>. De esta forma los morteros diseñados se clasificarían como CS IV en el caso de los morteros de revoco y enlucido y como M 5 en el caso de los morteros de albañilería, ya que la actual norma no observa el tipo M 7,5, muy usado en la práctica y que permite fábricas de resistencia característica media, según lo establecido en el CTE.

### 5.2.3.2. Composición de los morteros según su resistencia

A continuación se incluyen las distintas dosificaciones ensayadas para encontrar las adecuadas en función de la resistencia que se quiere obtener en los morteros.

A pesar de que la documentación técnica hace referencia, en la mayoría de los casos a dosificaciones en partes por volumen, en este trabajo se van a hacer en peso ya que los morteros realizados en fábrica así lo hacen, y porque, en el laboratorio, dosificar en peso permite una mayor exactitud en los ensayos y reproducibilidad en las distintas amasadas.

#### 5.2.3.2.1. Procedimiento experimental

Se preparan inicialmente dosificaciones con proporciones en peso 1/4, 1/6 y 1/8 (relación cemento/arena) con las pizarras PIZ I y PIZ IV y los cementos CEM II/B-L 32,5 R y CEM IV/B (V) 32,5 N, previamente seleccionados. Se pretende estudiar su resistencia a compresión característica según la norma

UNE-EN 1015-11. El procedimiento operatorio de este ensayo se ha explicado en el capítulo 3.

Para poder proceder a comparar los datos obtenidos en los ensayos de dosificaciones diferentes, se establece que los morteros se preparen, en la medida de lo posible, con una consistencia apropiada para su empleo. Esta idea, trasladada a un marco normativo, se observa en la norma UNE-EN 1015-2 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo”, en la que se fija la consistencia que debe alcanzar un mortero fresco en función de su densidad aparente, amasado según establece dicha norma. Para evaluar la consistencia de un mortero se realiza el ensayo definido en la norma UNE-EN 1015-3 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)”. Mediante este ensayo se obtienen valores de escurrimiento del mortero en mm.

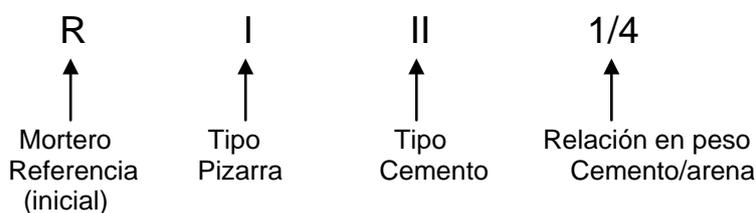
La norma UNE-EN 1015-2 establece que para morteros de densidad superior a  $1200 \text{ kg/m}^3$  el valor de escurrimiento será de  $175 \pm 10$  mm.

Los procedimientos de amasado y determinación de la consistencia han sido explicados en el capítulo 3.

Así, en un primer momento se establece la relación agua/cemento de las distintas dosificaciones para alcanzar la consistencia adecuada mediante el ensayo de la mesa de sacudidas y, posteriormente, se procede a la fabricación y curado de probetas para la determinación de las resistencias mecánicas de estos morteros iniciales.

#### 5.2.3.2.2. Denominación de los morteros

Los morteros se nombrarán como se indica a continuación:



A esta nomenclatura se le añade el número de muestra que le corresponda.

### 5.2.3.2.3. Resultados obtenidos

#### 5.2.3.2.3.1. Consistencia

A continuación se recogen los resultados obtenidos con distintas relaciones agua/cemento en las dosificaciones iniciales para alcanzar la consistencia de  $175 \pm 10$  mm.

MORTERO	DOSIFICACIÓN (Kg por 100 Kg mortero)		AGUA (kg)	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO mm.
	CEMENTO	ARENA			
R I II 1/4 1)	20,0	80,0	17,8	0,89	189
R I II 1/4 2)			17,0	0,85	183
R I II 1/4 3)			15,7	0,78	161
R I II 1/6 1)	14,3	85,7	18,7	1,31	194
R I II 1/6 2)			16,9	1,18	187
R I II 1/6 3)			16,6	1,16	176
R I II 1/8 1)	11,1	88,9	17,4	1,57	192
R I II 1/8 2)			16,7	1,50	177
R I II 1/8 3)			16,2	1,46	163

Figura 5.7. Consistencias en función de la relación A/C de morteros con PIZ 1 y CEM II

MORTERO	DOSIFICACIÓN (Kg por 100 Kg mortero)		AGUA (kg)	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO mm.
	CEMENTO	ARENA			
R I IV 1/4 1)	20,0	80,0	17,0	0,85	189
R I IV 1/4 2)			16,2	0,81	179
R I IV 1/4 3)			15,8	0,79	167
R I IV 1/6 1)	14,3	85,7	16,4	1,15	184
R I IV 1/6 2)			15,9	1,11	176
R I IV 1/6 3)			15,3	1,07	166
R I IV 1/8 1)	11,1	88,9	17,3	1,56	201
R I IV 1/8 2)			16,5	1,49	183
R I IV 1/8 3)			15,5	1,40	164

Figura 5.8. Consistencias en función de la relación A/C de morteros con PIZ 1 y CEM IV

MORTERO	DOSIFICACIÓN (Kg por 100 Kg mortero)		AGUA (kg)	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO mm.
	CEMENTO	ARENA			
R IV II 1/4 1)	20,0	80,0	18,0	0,90	195
R IV II 1/4 2)			17,4	0,87	185
R IV II 1/4 3)			17,0	0,85	182
R IV II 1/6 1)	14,3	85,7	17,3	1,21	194
R IV II 1/6 2)			16,9	1,18	168
R IV II 1/6 3)			16,2	1,13	163
R IV II 1/8 1)	11,1	88,9	16,9	1,52	184
R IV II 1/8 2)			16,5	1,49	178
R IV II 1/8 3)			15,9	1,43	163

Figura 5.9. Consistencias en función de la relación A/C de morteros con PIZ 4 y CEM II

MORTERO	DOSIFICACIÓN (Kg por 100 Kg mortero)		AGUA (kg)	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO mm.
	CEMENTO	ARENA			
R IV IV 1/4 1)	20,0	80,0	17,6	0,88	200
R IV IV 1/4 2)			17,0	0,85	185
R IV IV 1/4 3)			16,0	0,80	173
R IV IV 1/6 1)	14,3	85,7	17,3	1,21	189
R IV IV 1/6 2)			16,6	1,16	180
R IV IV 1/6 3)			16,2	1,13	164
R IV IV 1/8 1)	11,1	88,9	17,4	1,57	190
R IV IV 1/8 2)			17,1	1,54	184
R IV IV 1/8 3)			16,5	1,49	180

Figura 5.10. Consistencias en función de la relación A/C de morteros con PIZ 4 y CEM IV

Todas las dosificaciones ensayadas requieren una moderada cantidad de agua para conseguir morteros con consistencias normales, es decir, con escurrimiento de  $175 \pm 10$  mm en la mesa de sacudidas según la norma UNE-EN 1015-2. En concreto, para las dosificaciones con relación cemento/arena de 1/6, la relación agua/cemento siempre es mayor de 1,1; lo que representa una cantidad de agua superior al 15% sobre el peso total del mortero seco. Estas cantidades, aun siendo algo elevadas, están en consonancia con las preestablecidas para los morteros disponibles en el mercado.

En cuanto al árido, las propiedades que afectan principalmente a la cantidad de agua de amasado requerida en el mortero son el contenido de finos y la forma de las partículas de dicho árido. En ambos casos los morteros diseñados apuntan a un gran consumo de agua ya que se incluye un alto porcentaje de finos en la granulometría, para el mejor aprovechamiento de las pizarras machacadas, y la forma de las partículas de las arenas de pizarra es, en gran medida, lajosa, debido a la tendencia natural de este tipo de roca a romper en forma de finas láminas según sus planos de exfoliación.

La disminución de la relación agua/cemento mejoraría los morteros, ya que los haría más compactos, con menos porosidad y capilaridad debida a la

marcha del agua de amasado en los procesos de fraguado y endurecimiento y, por tanto, más resistentes y durables.

### 5.2.3.2.3.2. Resistencia a compresión

En la tabla de la Figura 5.11 se presentan los valores de resistencia a compresión de las diferentes dosificaciones a los 28 días de edad, una vez establecida la relación agua/cemento de cada una de ellas para alcanzar la consistencia que establece la norma o consistencia normal.

MORTERO	DOSIFICACIÓN (Kg por 100 Kg mortero)		RELACIÓN A/C	RESISTENCIA COMPRESIÓN N/mm <sup>2</sup>
	CEMENTO	ARENA		
R I II 1/4	20,0	80,0	0,85	20,4
R I II 1/6	14,3	85,7	1,16	8,8
R I II 1/8	11,1	88,9	1,50	7,5
R I IV 1/4	20,0	80,0	0,81	19,9
R I IV 1/6	14,3	85,7	1,11	9,9
R I IV 1/8	11,1	88,9	1,49	6,1
R IV II 1/4	20,0	80,0	0,85	19,3
R IV II 1/6	14,3	85,7	1,18	11,7
R IV II 1/8	11,1	88,9	1,49	8,7
R IV IV 1/4	20,0	80,0	0,80	17,5
R IV IV 1/6	14,3	85,7	1,16	9,1
R IV IV 1/8	11,1	88,9	1,49	6,4

Figura 5.11. Valores medios de resistencia a compresión de morteros con 28 días de edad

Con los dos cementos empleados se han conseguido resistencias mayores a la prefijada con relaciones cemento/arena de 1/6. Es importante partir de morteros con resistencias suficientes ya que, en futuras modificaciones de éstos mediante inclusión de aditivos, estas resistencias pueden verse disminuidas, en beneficio de la mejora de otras propiedades.

En el gráfico de la Figura 5.11 se puede observar que dosificaciones con relaciones cemento/arena de 1/4 generan morteros con resistencias muy elevadas, mientras que morteros con relaciones 1/8 presentan resistencias menores o muy ajustadas al valor preestablecido en este trabajo para la resistencia a la compresión.

De esta forma, en principio, se puede considerar que la relación 1/6 de cemento/arena establece un equilibrio adecuado entre un empleo contenido de cemento, que conlleva morteros más asequibles en cuanto a costes de

producción, y unas buenas características en lo que se refiere a resistencias mecánicas.

#### 5.2.4. Caracterización de los morteros iniciales

Se entiende como caracterización de un mortero a la realización de un conjunto de ensayos para obtener los valores de una serie de características que definen a ese mortero, en cuanto a su comportamiento y posible utilidad en obra. Dichos ensayos se encuentran recogidos, en gran medida, en las normas UNE-EN 998 de especificaciones de los morteros, aunque se han incluido otros que se han estimado interesantes para el conocimiento profundo del comportamiento de los morteros realizados con pizarra.

Se llevan a cabo ensayos del mortero en estado fresco y también del mortero una vez endurecido. En este capítulo se recogen los resultados de los cuatro morteros iniciales que se han seleccionado para el posterior desarrollo en este trabajo.

##### 5.2.4.1. Propiedades del mortero fresco

Se estudian las siguientes 4 propiedades del mortero fresco: Densidad aparente, contenido en aire, capacidad de retención de agua y determinación del período de trabajabilidad.

Los ensayos se realizan de acuerdo a las normas UNE o UNE-EN correspondientes y el procedimiento de cada uno se recoge, debidamente explicado, en el capítulo 3 de este trabajo.

##### 5.2.4.1.1. Densidad aparente

La tabla de la Figura 5.12 recoge las densidades de los cuatro morteros iniciales que se han seleccionado. Se incluye también la relación agua/cemento que se ha utilizado para tener los morteros con la consistencia normal establecida.

MORTERO	RELACIÓN A/C	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )
R I II 1/6	1,16	2210
R I IV 1/6	1,11	2210
R IV II 1/6	1,18	2220
R IV IV 1/6	1,16	2210

Figura 5.12. Densidades aparentes de los morteros frescos

#### 5.2.4.1.2. Contenido en aire

El contenido en aire se recoge en la tabla de la Figura 5.13 en % de aire en el mortero, según el método de presión descrito en la norma UNE-EN 1015-7 y explicado en el capítulo 3.

MORTERO	RELACIÓN A/C	CONTENIDO DE AIRE (%)
R I III 1/6	1,16	3,5
R I IV 1/6	1,11	4,0
R IV II 1/6	1,18	3,5
R IV IV 1/6	1,16	3,0

Figura 5.13. Contenido en aire en los morteros frescos

Como se puede ver en la Figura 5.12, las densidades de los cuatro morteros en estado fresco superan los 2.200 kg/m<sup>3</sup>. Estas densidades son muy elevadas en comparación con las de los materiales disponibles en el mercado.

Los contenidos de aire son, en consonancia, muy bajos, del orden del 3 o el 4%.

Con estos valores de densidad y contenido de aire los morteros son difíciles de mover y muy pesados de trabajar, con lo que resultarían muy incómodos para el profesional a la hora de su aplicación cotidiana en obra. Este es un aspecto importante para conseguir una aceptación del producto en su ámbito de utilización, ya que una manipulación sencilla redundaría en mayor comodidad para el aplicador, lo que suele derivar en una mayor rapidez de ejecución manteniendo los estándares de calidad. Estos aspectos son, todos ellos, de gran relevancia en el ámbito de la construcción, donde va destinado el uso de los materiales que se desarrollan en esta Tesis Doctoral.

Parece claro que se debe trabajar hacia una reducción de la densidad de los morteros frescos de manera que estos resulten más fáciles de manipular en su puesta en obra.

#### 5.2.4.1.3. Retención de agua

Los valores de la retención de agua según la norma UNE 83-816-93 se incluyen en la tabla de la Figura 5.14. Estos valores indican la cantidad de agua, en tanto por ciento, que queda retenida en el mortero después de realizarse el ensayo.

MORTERO	RELACIÓN A/C	RETENCIÓN DE AGUA (%)
R I II 1/6	1,16	85
R I IV 1/6	1,11	86
R IV II 1/6	1,18	86
R IV IV 1/6	1,16	87

Figura 5.14. Retención de agua en los morteros frescos

Los valores obtenidos son correctos aunque ligeramente bajos. Esto es reflejo de que, aun consiguiéndose morteros homogéneos y uniformes con el amasado, existe cierta tendencia a exudar agua de la mezcla una vez finalizado éste.

#### 5.2.4.1.4. Determinación del período de trabajabilidad

El período de trabajabilidad de los morteros hasta que estos alcanzan una cierta rigidez se refleja, como un período de tiempo en minutos desde su amasado, en la tabla de la Figura 5.15. Es en este espacio de tiempo en el que el mortero tiene la plasticidad adecuada para su aplicación.

MORTERO	RELACIÓN A/C	TRABAJABILIDAD (min.)
R I II 1/6	1,16	54
R I IV 1/6	1,11	72
R IV II 1/6	1,18	45
R IV IV 1/6	1,16	55

Figura 5.15. Trabajabilidad y tiempo abierto de los morteros frescos

Los períodos de trabajabilidad son excesivamente cortos. Esto limita mucho el tiempo de utilización del mortero, una vez amasado, y no resulta operativo, ya que en la obra pueden concurrir múltiples circunstancias que, en muchas ocasiones, alargan los tiempos de aplicación de los productos. Un mortero adecuado debe permitir un tiempo de utilización razonable para su correcta puesta en obra.

El aumento del período de trabajabilidad de los morteros es una de las propiedades a mejorar en los materiales de inicio caracterizados.

#### 5.2.4.2. Propiedades del mortero endurecido

Debido a la variedad de los campos de aplicación y de las condiciones de exposición, se estudia una amplia gama de propiedades en los morteros endurecidos, con las que se verifica que dichos morteros poseen las prestaciones adecuadas a los usos a los que serán destinados.

En este apartado se incluyen los ensayos de resistencias mecánicas, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua, absorción de agua por capilaridad, resistencia a la adhesión, resistencia inicial a cortante y ensayos de durabilidad.

#### 5.2.4.2.1. Resistencias mecánicas

En la figura 5.16 se incluyen las resistencias medias a flexión y a compresión de los morteros ensayados a la edad de 7 y 28 días siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 1015-11. Aunque las resistencias mecánicas que se observan para definir y denominar a los morteros son las obtenidas a los 28 días de edad, los datos recogidos a los 7 días dan mucha información acerca de la evolución del proceso de endurecimiento y, en general, del comportamiento del mortero ante los esfuerzos.

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 7d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 7d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )
R I III 1/6	1,9	7,4	2,8	8,8
R I IV 1/6	1,5	5,9	3,1	9,9
R IV II 1/6	1,7	7,9	3,4	11,7
R IV IV 1/6	1,8	6,0	2,6	9,1

Figura 5.16. Resistencias mecánicas de los morteros endurecidos

#### 5.2.4.2.2. Densidad aparente

A continuación se incluyen las densidades medias de los morteros endurecidos medidas según la norma UNE-EN 1015-10.

MORTERO	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	MORTERO	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
R I III 1/6	2020	R IV II 1/6	1990
R I IV 1/6	2060	R IV IV 1/6	1990

Figura 5.17. Densidad aparente de los morteros endurecidos

Como en el caso de las densidades de los morteros frescos, estas densidades son bastante elevadas.

En la tabla que se incluye a continuación se comparan los valores de densidades de mortero fresco y endurecido, obteniéndose el porcentaje de agua que se elimina del mortero. Esta agua correspondería a la parte de agua de amasado que hay que incluir para que el mortero fresco alcance la consistencia normal (175±10 mm de escurrimiento en mesa de sacudidas) y se pueda trabajar adecuadamente. Dicha agua no se emplea para la

hidratación del cemento o los conglomerantes hidráulicos presentes y, por lo tanto, debe abandonar el mortero cuando este fragua y endurece.

MORTERO	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	AGUA ELIMINADA (Kg/m <sup>3</sup> )	AGUA ELIMINADA (% mortero endurecido)
R I II 1/6	2210	2020	190	9,4
R I IV 1/6	2210	2060	150	7,3
R IV II 1/6	2220	1990	230	11,6
R IV IV 1/6	2210	1990	220	11,1

Figura 5.18. Diferencia de densidades de los morteros frescos y endurecidos. Porcentajes de agua eliminada en cada tipo de mortero.

En la Figura 5.18 se observa que los morteros realizados con pizarra 4 emplean mayor cantidad del agua de amasado para alcanzar la consistencia normal que morteros con pizarra 1, por lo tanto eliminan mayor porcentaje de agua. Este comportamiento puede ser debido a que la pizarra 4 tiene una absorción de agua mayor a la pizarra 1, como se puede ver en las propiedades de las pizarras en el capítulo 4, con lo que los finos del árido del mortero de pizarra 4 absorben más agua que los de la otra pizarra y, posteriormente, este exceso de agua sale del mortero.

En la Figura 5.19 se incluyen los cálculos de porcentajes de agua con los que se amasan los morteros, especificando qué cantidades se pierden en el fraguado y endurecimiento y qué cantidades quedan retenidas en las nuevas estructuras minerales que se forman en el mortero.

MORTERO	AGUA AMASADO (% peso mortero fresco)	AGUA ELIMINADA (% agua de amasado)	AGUA DE CONSTITUCIÓN (% agua de amasado)
R I II 1/6	14,2	60,6	39,4
R I IV 1/6	13,7	49,6	50,4
R IV II 1/6	14,5	71,7	28,3
R IV IV 1/6	14,2	70,4	29,6

Figura 5.19. % agua de amasado y distribución de ésta según se elimina o permanece en el mortero

Los altos porcentajes de agua de amasado eliminada de los morteros hacen pensar que los morteros diseñados resultarán muy permeables y presentarán una importante capilaridad interior, como resultado de la salida de la elevada cantidad de agua excluida.

La permeabilidad al agua del mortero es una característica no deseable, sobre todo en morteros destinados a acabados en exteriores, y, por lo tanto, otro punto a mejorar en este trabajo.

### 5.2.4.2.3. Permeabilidad al vapor de agua

En la Figura 5.20 se incluyen los resultados del ensayo de permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido según la norma UNE-EN 1015-19. Se presentan valores medios de permeanza al vapor de agua, permeabilidad al vapor de agua y coeficiente de permeabilidad al vapor de agua.

MORTERO	PERMEANZA ( $\Delta$ ) (Kg/m <sup>2</sup> .s.Pa)	PERMEABILIDAD (Kg/m.s.Pa)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD ( $\mu$ )
R I III 1/6	1,56E <sup>-9</sup>	2,50E <sup>-11</sup>	8
R I IV 1/6	8,63E <sup>-10</sup>	1,34E <sup>-11</sup>	15
R IV II 1/6	1,31E <sup>-9</sup>	2,10 E <sup>-11</sup>	11
R IV IV 1/6	1,14E <sup>-9</sup>	1,82E <sup>-11</sup>	11

Figura 5.20. Permeanza, permeabilidad y coeficiente de permeabilidad s/ UNE EN 1015-19

Los coeficientes de permeabilidad al vapor de agua,  $\mu$ , de la Figura 5.20 son todos ellos bajos, siendo el mayor valor de 15. Esto indica que los morteros son muy permeables al vapor de agua.

La norma UNE-EN 1745 “Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos del proyecto”<sup>118</sup> establece valores de los coeficientes de permeabilidad al vapor de agua en función de las densidades de los morteros y son éstos los que los fabricantes suelen incluir en las fichas técnicas de los morteros disponibles en el mercado. Para morteros de densidades similares a los de este trabajo, en torno a 2.000 kg/m<sup>3</sup>, los valores del coeficiente se tabulan entre 15 y 35.

La alta permeabilidad de los morteros al vapor de agua es una buena cualidad para estos ya que facilita los movimientos del vapor de agua hacia adentro o hacia fuera de los espacios confinados en las edificaciones evitando condensaciones y facilitando un buen confort en cuanto a la humedad.

<sup>118</sup> UNE-EN 1745: 2002, Fabrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos de proyecto, Asociación Española de Normalización y Certificación (2002).

Sin embargo, una alta permeabilidad en un material de una cierta densidad puede ser debida a una inadecuada dimensión y distribución de su porosidad, que facilite una comunicación hacia el exterior capaz de permitir el paso no solo del vapor, sino también del agua líquida a su través.

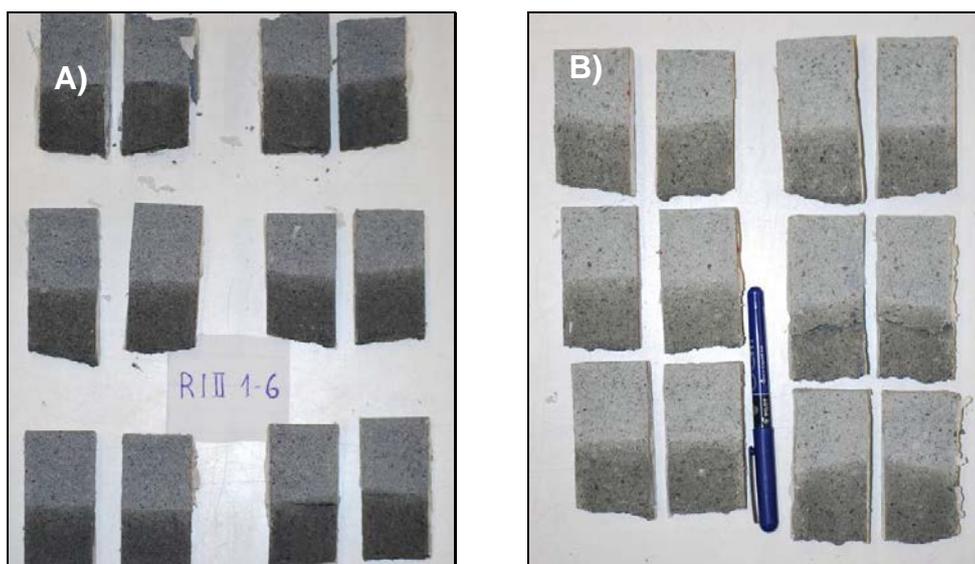
#### 5.2.4.2.4. Absorción por capilaridad

En este punto se presentan los coeficientes de absorción de agua de los morteros ensayados según la norma UNE-EN 1015-18. También se incluye la altura de penetración máxima del agua en el interior de las probetas (Figura 5.21). Este dato es preceptivo, según la norma, solo para los morteros de reparación, pero aporta una información muy esclarecedora acerca de la capacidad del agua para penetrar en los distintos morteros.

MORTERO	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN $\text{Kg/m}^2 \text{min}^{1/2}$	ALTURA MÁXIMA MEDIA DE PENETRACIÓN (mm)
R I II 1/6	0,6	38
R I IV 1/6	0,8	35
R IV II 1/6	0,6	38
R IV IV 1/6	1,1	65

Figura 5.21. Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad

En la Figura 5.22 se incluyen imágenes de las probetas ensayadas, en las que se observa la altura a la que ha ascendido el agua en cada una de ellas.



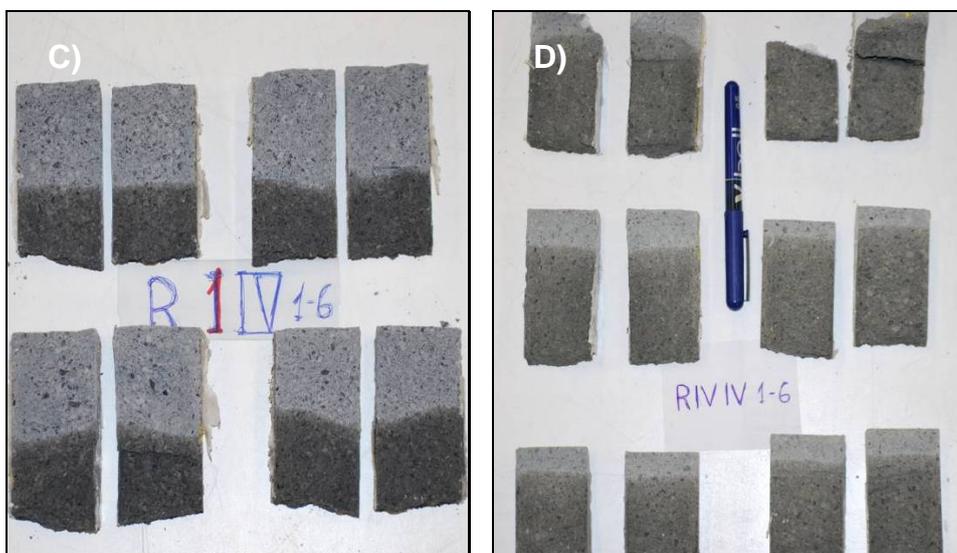


Figura 5.22. Penetración del agua en probetas de mortero en el ensayo de absorción de agua. A) R I II 1-6; B) R IV II 1-6; C) R I IV 1-6; D) R IV IV 1-6

Los coeficientes de absorción son bastante elevados con lo que se puede decir que los morteros presentan una alta absorción de agua. Este hecho se puede verificar, de forma directa, observando los frentes de penetración del agua, que han alcanzado profundidades destacables en todas las probetas ensayadas.

Los resultados de permeabilidad y absorción, junto con los datos de los porcentajes de agua de amasado eliminada en los morteros endurecidos, llevan a pensar que los morteros diseñados presentan una distribución de sus redes capilares que permite el paso a través suyo no solo de vapor, sino también de agua líquida o de los fluidos contaminantes con los que puedan entrar en contacto. Este hecho constituye una cuestión a mejorar a la hora de modificar las dosificaciones.

#### 5.2.4.2.5. Resistencia a la adhesión

Este ensayo se lleva a cabo según la norma UNE-EN 1015-12, como se explica en el capítulo 3. En la Figura 5.23 se presentan los valores medios de la resistencia a la adherencia y las descripciones de los tipos de rotura que se producen en los morteros de inicio.

MORTERO	RESISTENCIA A LA ADHESIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO DE ROTURA
R I II 1/6	0,34	A (ADHESIVA)
R I IV 1/6	0,45	A
R IV II 1/6	0,62	B (COHESIVA MORTERO)
R IV IV 1/6	0,52	A

Figura 5.23. Valores medios de resistencia a la adhesión y tipos de rotura

Las imágenes de la Figura 5.24 pertenecen a los ensayos realizados y ejemplifican los tipos de rotura que se han obtenido.

Los valores de adhesión de los morteros endurecidos son bastante altos, estando todos ellos por encima de 0,3 N/mm<sup>2</sup>. En todos los casos el tipo de rotura era adhesiva en la interfase mortero/soporte, excepto en el caso del valor más alto de resistencia, en el que la rotura se produjo en el mortero.

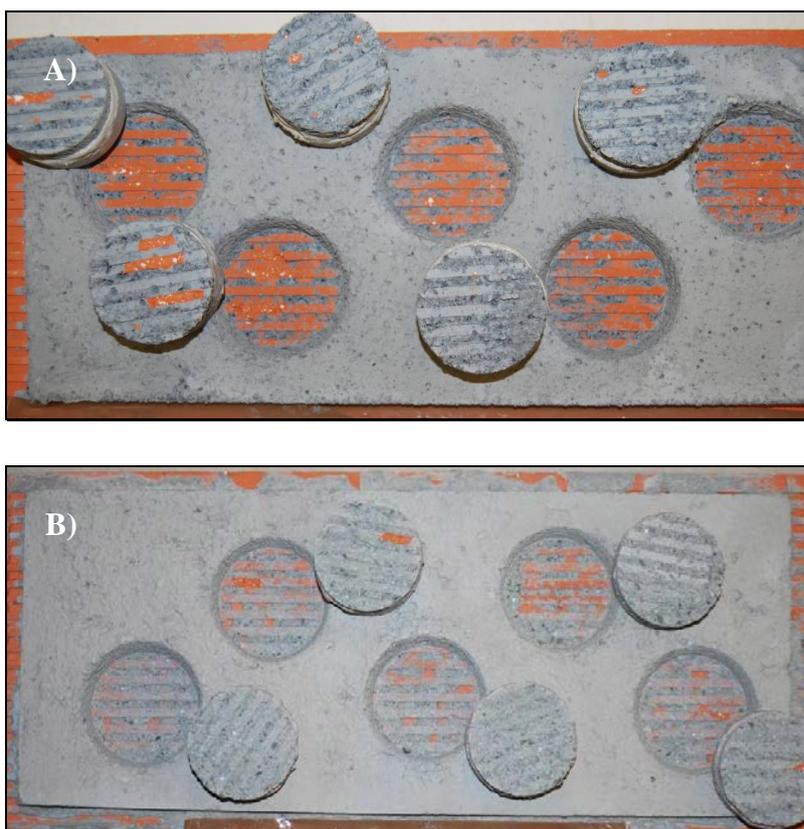


Figura 5.24. A) Rotura adhesiva de probetas de mortero R I II 1-6; B) Rotura cohesiva en el mortero en probetas de mortero R IV II 1-6

### 5.2.4.2.6. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería

En la Figura 5.25 se incluyen los valores medios de resistencia inicial a cortante en probetas con carga de compresión previa igual a cero, según la norma UNE-EN 1052-3. También se incluyen los tipos de rotura que se han producido.

MORTERO	RESISTENCIA INICIAL A CORTANTE (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO DE ROTURA
R I II 1/6	0,64	UNIÓN PIEZA/MORTERO
R I IV 1/6	0,50	UNIÓN PIEZA/MORTERO
R IV II 1/6	0,54	UNIÓN PIEZA/MORTERO
R IV IV 1/6	0,46	UNIÓN PIEZA/MORTERO

Figura 5.25. Valores medios de resistencia inicial a cortante y tipos de rotura

En la imagen de la Figura 5.26 se ilustra una de las roturas unión pieza/mortero, que se ha dado en los ensayos llevados a cabo.



Figura 5.26. Fallo a cortante en la unión pieza/mortero, divide entre las caras de dos piezas

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia inicial a cortante han sido bastante elevados. Todos ellos por encima de 0,45 N/mm<sup>2</sup> y muy por encima del valor de 0,15 N/mm<sup>2</sup>, que es el valor declarado que más se repite en las fichas técnicas de los morteros que se encuentran en el mercado. Considerando estos resultados en conjunto con los del ensayo de adhesión, se puede concluir que los morteros iniciales presentan buenas aptitudes para unirse a otros materiales para formar unidades sólidas y resistentes.

### 5.2.4.3. Durabilidad

Los ensayos de durabilidad abarcan el ensayo al dióxido de azufre, denominado, en las normas DIN alemanas, ensayo Kesternich de corrosión, el de resistencia a ciclos hielo-deshielo, el de resistencia a sales disueltas y el ensayo de reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. Estos ensayos se tratan aparte por su particularidad, ya que implican procesos de envejecimiento acelerado realizados en morteros endurecidos, en los que se estudia la respuesta de estos en condiciones extremas.

A continuación se recogen los resultados de los ensayos que se les han realizado a los morteros endurecidos.

#### 5.2.4.3.1. Ensayo al dióxido de azufre (Kesternich)

Después de someter a las probetas de mortero a 15 ciclos de exposición al dióxido de azufre siguiendo el método de la norma UNE-EN ISO 6988-1, explicado en el capítulo 3, se realiza una inspección visual para verificar los posibles cambios en cuanto al aspecto exterior de las probetas, se secan, se pesan y se someten a su rotura a flexión y compresión para comparar estos resultados con los obtenidos de probetas referencia de la misma edad y que no han sido sometidas a los ciclos.

Como se puede observar en la Figura 5.27, el aspecto de las probetas apenas difiere de las probetas de referencia, ni en cuanto al color ni en cuanto a la aparición de alteraciones o pérdidas de masa.





Figura 5.27. Foto superior: Probetas de referencia.  
Foto inferior: Probetas sometidas a ciclos con SO<sub>2</sub>

En las Figuras 5.28 y 5.29 se incluyen los resultados obtenidos de variaciones de masas y resistencias mecánicas respectivamente.

MORTERO	MASA DE LAS PROBETAS (g)		VARIACIÓN DE LA MASA (%)
	ANTES	DESPUÉS	
R I II 1/6 5)	522,2	526,9	0,9
R I II 1/6 6)	519,5	523,7	0,8
R I IV 1/6 5)	506,1	510,5	0,9
R I IV 1/6 6)	507,4	511,4	0,8
R IV II 1/6 9)	511,0	515,3	0,8
R IV II 1/6 10)	509,1	513,1	0,8
R IV IV 1/6 5)	511,7	515,3	0,7
R IV IV 1/6 6)	508,8	512,5	0,7

Figura 5.28. Cambios en las masas en probetas sometidas a ciclos con SO<sub>2</sub>

MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (%)
	SIN CICLOS	CON CICLOS	
R I II 1/6	17,9	24,6	37,4
R I IV 1/6	10,8	15,8	46,3
R IV II 1/6	14,6	17,6	20,5
R IV IV 1/6	12,0	18,3	52,5

Figura 5.29. Variaciones de las resistencias a compresión en probetas sometidas a ciclos con SO<sub>2</sub> respecto a probetas de referencia

Todas las masas de las probetas ensayadas aumentan algo menos de un 1% con respecto a la masa inicial antes de someterse a los ciclos.

La resistencia a compresión aumenta de manera considerable en todos los casos, siendo este aumento más pronunciado en los morteros realizados con cemento tipo IV.

El ensayo de exposición al dióxido de azufre pretende reflejar, de forma acelerada, el comportamiento de los materiales ante un ambiente agresivo como podría ser el de una zona industrial en la que se liberen gases de azufre derivados de procesos de fabricación, potencialmente contaminantes y que en muchos casos dan lugar a la generación de lluvias ácidas.

En estas circunstancias todos los morteros han demostrado un comportamiento muy adecuado.

Las probetas no han sufrido cambios exteriores notables, salvo un leve "aclarado de color" que puede ser fruto de la condensación de agua en superficie durante los ciclos, que puede haberlas "lavado" ligeramente.

Todas las muestras han aumentado de peso en algo menos de un 1%. Este aumento se puede deber a varios factores. Una causa probable es la formación de sulfatos alcalinos o alcalinotérreos en el interior del mortero, debido al ambiente de dióxido de azufre, calor y humedad. Este hecho se ha corroborado empíricamente llevando a cabo una precipitación con cloruro de bario de los sulfatos solubles de muestras de una probeta sometida a ciclos y una probeta de referencia de la misma dosificación. En la Figura 5.30 se observa como el mortero sometido a ciclos con  $\text{SO}_2$  presenta un incremento significativo en la concentración de sulfatos solubles con respecto al de referencia.

También cabe pensar que en los ambientes de alta humedad, proporcionados por los ciclos, los morteros hayan incluido agua de hidratación en sus estructuras minerales. Esto respondería tanto al aumento de peso como a la mejora en las resistencias que presentan los morteros con relación a los de referencia de la misma edad. Como se observa en la Figura 5.29, las probetas sometidas a los ciclos con  $\text{SO}_2$  presentan aumentos sustanciales de las resistencias mecánicas que denotan un aumento en la dureza de las estructuras minerales presentes en los morteros.

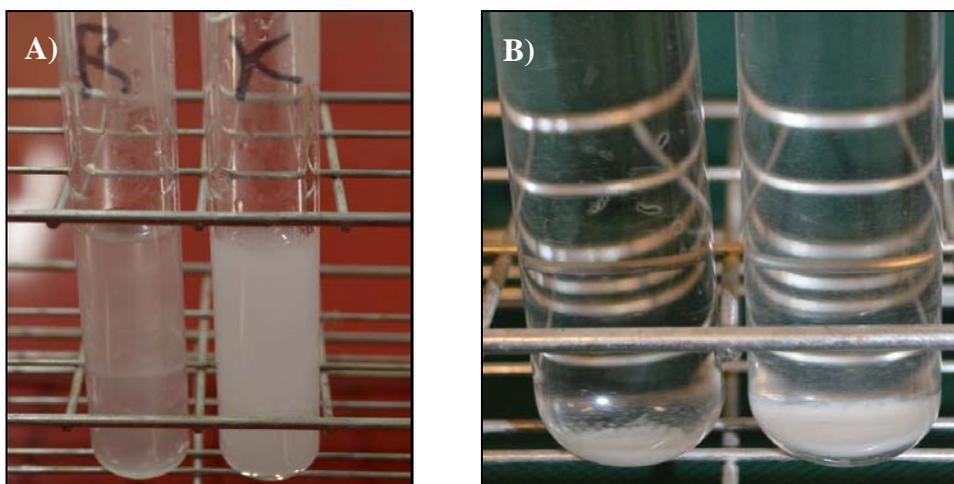


Figura 5.30. Formación de sulfato de bario en muestra de referencia (tubo de ensayo de la izquierda) y en muestra sometida a exposición al  $\text{SO}_2$  (tubo de ensayo de la derecha). A) Turbidez en el momento de la formación de los sulfatos. B) Sulfatos decantados en el fondo de los tubos.

#### 5.2.4.3.2. Heladicidad

Ante la no existencia de una norma específica para el ensayo de heladicidad en morteros, se ha tomado como referencia la norma UNE 67028 EX "Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Heladicidad". En este ensayo se llevan a cabo 25 ciclos de hielo-deshielo pasando las probetas de estar sumergidas en agua a  $18\text{ }^\circ\text{C}$  a permanecer en un congelador a  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ .

Los efectos de los ciclos hielo-deshielo sobre las probetas se valoran en tres aspectos: La inspección visual del aspecto exterior, la medición de las variaciones de masa y la comparación de la resistencia a compresión de las probetas sometidas a los ciclos con probetas de referencia de la misma edad, que no han sido sometidas a ciclos.

En cuanto al aspecto exterior de las probetas, se observa en todas ellas pérdidas de la pasta de cemento exterior que las recubre, especialmente en las esquinas de los prismas. En algunas, en particular, se han producido importantes mermas en el mortero, sobre todo por la cara que se enrasa en el molde y que, por tanto, no está recubierta exteriormente por la pasta de cemento (Figura 5.31).

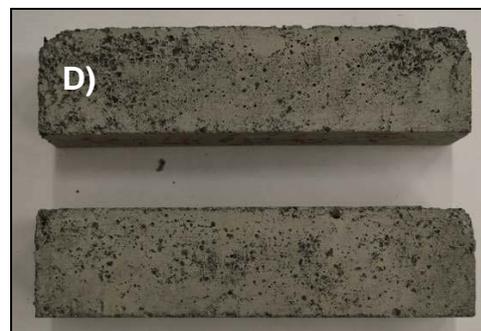




Figura 5.31. Probetas sometidas a ensayo de heladicidad. A) Probetas de referencia. B) Probetas sometidas a ciclos hielo-deshielo. C) y D) Detalle de probetas de la dosificación RI II 1-6. E) y F) Detalle de probetas de la dosificación RI IV 1-6. G) y H) Detalle de probetas de la dosificación RIV II 1-6. I) y J) Detalle de probetas de la dosificación RIV IV 1-6

En la Figura 5.32 se incluyen los resultados de las variaciones de masa sufridas por las probetas ensayadas, con respecto a las masas iniciales de las mismas.

MORTERO	MASA DE LAS PROBETAS (g)		VARIACIÓN DE LA MASA (%)
	ANTES	DESPUÉS	
R I II 1/6 3	520,2	513,9	-1,2
R I II 1/6 4	523,2	521,1	-0,4
R I IV 1/6 3	512,4	490,9	-4,2
R I IV 1/6 4	509,1	471,2	-7,4
R IV II 1/6 7	484,3	477,6	-1,4
R IV II 1/6 8	511,1	510,3	-0,2
R IV IV 1/6 3	500,7	435,9	-12,9
R IV IV 1/6 4	512,9	505,6	-1,4

Figura 5.32. Variaciones de masa en probetas sometidas a ciclos hielo-deshielo

Los datos de la tabla anterior corroboran las pérdidas de material apreciadas en la inspección visual.

En la Figura 5.33 se muestran los resultados de la variación de la resistencia a compresión de las probetas sometidas a ciclos hielo-deshielo frente a la resistencia a compresión de las probetas de referencia.

MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (%)
	SIN CICLOS	CON CICLOS	
R I II 1/6	17,9	16,4	-8,4
R I IV 1/6	10,8	9,4	-14,9
R IV II 1/6	14,6	14,5	-0,7
R IV IV 1/6	12,0	10,4	-13,3

Figura 5.33. Variaciones de las resistencias a compresión en probetas sometidas a ciclos hielo-deshielo respecto a probetas de referencia

En todos los casos las resistencias a compresión sufren una disminución, más importante, de nuevo, en el caso de los morteros realizados con CEM IV.

De los resultados del ensayo de heladicidad se desprende que los morteros de referencia sufren degradación en el transcurso de los ciclos hielo-deshielo.

Visualmente se aprecia pérdida de material y aumento de porosidad en las superficies de las probetas. Las diferencias en las masas antes y después del ensayo evidencian estas pérdidas de material, que son la causa más probable de las sensibles pérdidas de resistencia que sufren los morteros, más importantes en el caso de los fabricados con CEM IV que en el resto.

Estos datos, apoyados con los obtenidos en absorción de agua por capilaridad y permeabilidad, hacen pensar que estos morteros presentan una importante capilaridad interna que facilita la introducción y difusión de fluidos en su interior. La disminución de esta capilaridad debería dar lugar a una

mejora en el comportamiento de los morteros en cuanto a su heladicidad. Este es otro aspecto a mejorar con la inclusión de aditivos.

### 5.2.4.3.3. Resistencia a la cristalización de sales

En este ensayo, realizado s/UNE-EN 12370, se evalúa, como en el anterior, el aspecto de las probetas mediante inspección visual, la pérdida o ganancia de masa después de los ciclos de cristalización y la variación de la resistencia a compresión que sufren las probetas ensayadas con respecto a las de referencia, que no han sido sometidas a los ciclos.

En la Figura 5.34 se incluyen distintas imágenes de las probetas ensayadas.

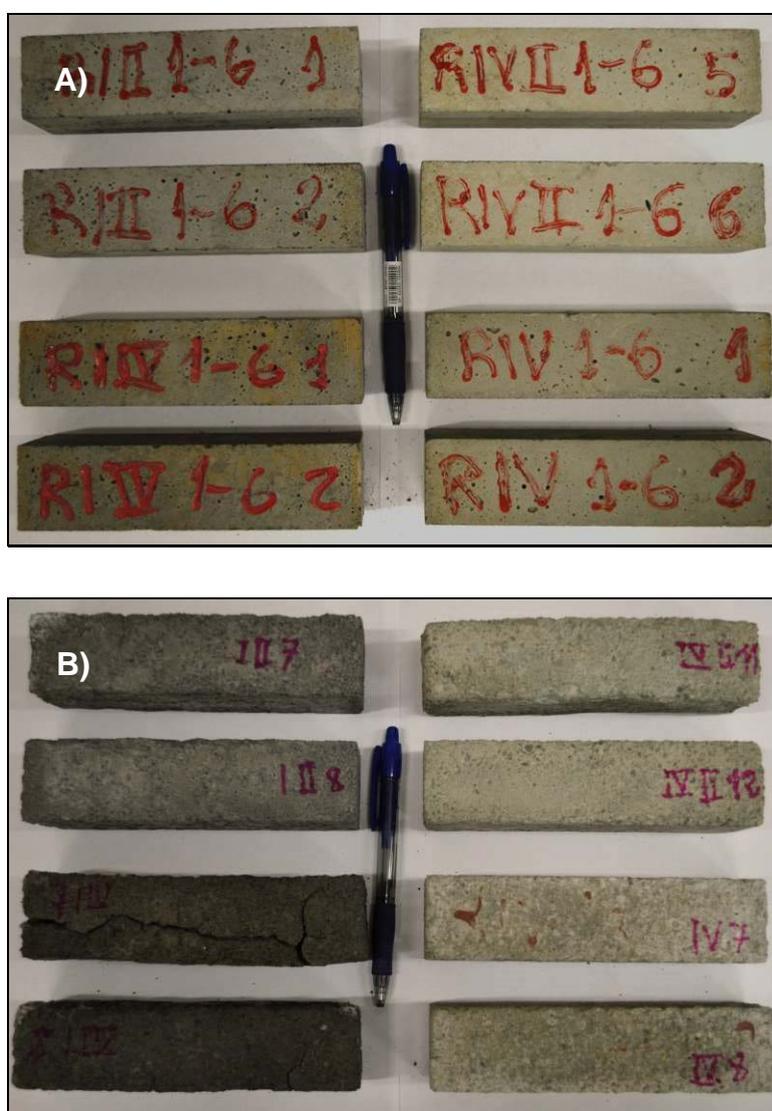




Figura 5.34. Probetas sometidas a ensayo de resistencia a la cristalización de sales. A) Probetas de referencia. B) Probetas sometidas a ciclos de cristalización. C) y D) Detalle de probetas de la dosificación RI II 1-6. E) y F) Detalle de probetas de la dosificación RI IV 1-6. G) y H) Detalle de probetas de la dosificación RIV II 1-6. I) y J) Detalle de probetas de la dosificación RIV IV 1-6.

En la inspección visual se puede apreciar que la cristalización de sales ha dañado la superficie de las probetas, eliminando gran parte de la pasta de cemento superficial de las caras. Sin embargo las probetas permanecen cohesionadas, mantienen su forma prismática inicial y no presentan daños relevantes en vértices o aristas, a excepción de la dosificación RI IV 1-6, en la que las sales han conseguido penetrar de tal forma en las probetas que estas han comenzado a fisurarse en el sexto ciclo de cristalización. Estas fisuras han ido aumentando a medida que se cumplían más ciclos hasta el punto de abrirse grietas que hacen peligrar la integridad de la probeta (Figura 5.34. Imágenes E) y F)).

En la Figura 5.35 se presentan los valores de las masas de las probetas antes y después de los ciclos de cristalización de sales.

MORTERO	MASA DE LAS PROBETAS (g)		VARIACIÓN DE MASA (%)
	ANTES	DESPUÉS	
R I II 1/6 7	516,7	530,1	2,6
R I II 1/6 8	518,0	536,7	3,6
R I IV 1/6 7	506,1	492,4	-2,7
R I IV 1/6 8	508,4	484,8	-4,6
R IV II 1/6 11	507,6	492,8	-2,9
R IV II 1/6 12	512,2	520,1	1,5
R IV IV 1/6 7	508,7	522,5	2,7
R IV IV 1/6 8	507,4	510,0	0,5

Figura 5.35. Variación de las masas en probetas sometidas a ciclos de cristalización de sales.

A pesar de que en todas las probetas se observan indicios de degradación, los resultados de las masas arrojan dos comportamientos divergentes. En unos casos las probetas han ganado masa una vez sometidas a los ciclos, mientras que en otros se ha desprendido una cantidad apreciable de material, lo que hace que las masas disminuyan sensiblemente.

En la Figura 5.36 se incluyen los resultados del ensayo de resistencia a la cristalización de sales. Las probetas se someten a rotura y se compara su resistencia a compresión frente a probetas de referencia de la misma edad.

Se registran aumentos muy importantes en las resistencias a compresión de los morteros excepto en la muestra cuyas probetas han desarrollado fisuras importantes.

MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (%)
	SIN CICLOS	CON CICLOS	
R I II 1/6	17,9	32,0	78,8
R I IV 1/6	10,8	9,5	-12,0
R IV II 1/6	14,6	19,0	30,1
R IV IV 1/6	12,0	23,5	95,8

Figura 5.36. Variación de las resistencias en probetas sometidas a ciclos humedad-sequedad en disolución de sales frente a probetas de referencia

Las tensiones generadas por la cristalización de las sales en el seno del mortero han tenido distintas consecuencias en las diferentes dosificaciones. El aspecto exterior de las probetas es bueno. Se conserva perfectamente la forma, a pesar de producirse un desgaste superficial semejante en todas las caras de las probetas. La excepción se produce en el mortero RI IV, que no ha soportado las fuerzas generadas por los cristales de sales y ha sufrido grandes fracturas en las probetas que hacían temer por la integridad de las mismas (Figura 5.34 E) y F)).

En el caso de las masas, a pesar de observarse la degradación superficial en todas las caras de las probetas, todas, excepto tres, han aumentado de peso. Esto se debe, con toda probabilidad, a la presencia de sulfato de sodio en los huecos interiores de las probetas. Esta es la sal que precipita al evaporarse el agua de la disolución en la que se introducen las probetas en los ciclos.

Para corroborar la existencia de sulfatos se ha repetido la comprobación con cloruro de bario. En este caso la presencia de estas sales en el mortero que ha sido sometido a ciclos es más notoria incluso que en ensayo al dióxido de azufre (Figura 5.37).

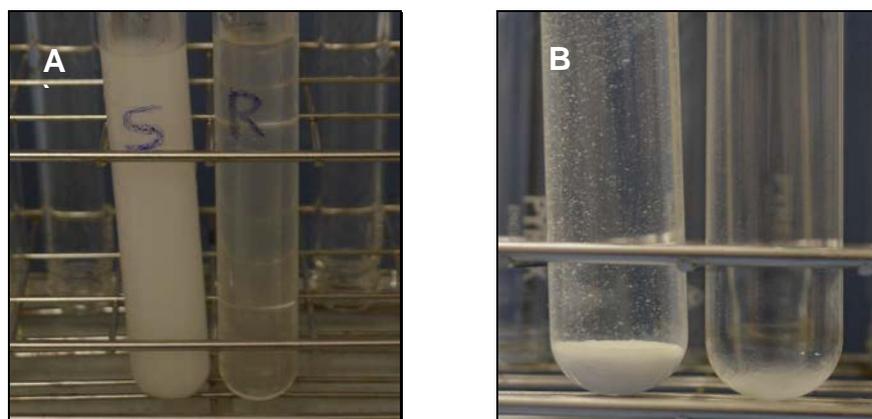


Figura 5.37. Formación de sulfato de bario en muestra de referencia (tubo de ensayo de la derecha) y en muestra sometida a cristalización de sales (tubo de ensayo de la izquierda). A) Turbidez en el momento de la formación de los sulfatos. B) Sulfatos decantados en el fondo de los tubos

En lo que se refiere a las resistencias a compresión, se observan aumentos muy grandes en todas las dosificaciones excepto en la que ha sufrido el agrietamiento de las probetas. Este comportamiento se puede deber a varios efectos de los ciclos a los que se han sometido los morteros.

Se debe destacar que aun con la pérdida de material superficial de las probetas estas han experimentado un aumento neto de peso. Esto es así excepto en tres probetas, las dos de la dosificación que no han soportado los ciclos y se han agrietado y una probeta de la dosificación RIV II, con una pérdida de material superficial mayor que las demás. Esto permite suponer que los morteros han alcanzado un alto grado de saturación de sus huecos con el sulfato de la disolución. También se ha de considerar la inclusión de agua de hidratación en fases minerales que se estabilizan en estructuras más resistentes con ayuda de las fuerzas a las que las someten los cristales de sal cuando solidifican. Todos estos efectos pueden justificar el gran aumento de resistencia que desarrollan los morteros que son capaces de soportar las fuerzas a las que se ven sometidos sin fracturarse.

#### 5.2.4.3.4. Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato

El estudio de la reactividad de las pizarras en los morteros iniciales se incluye en el capítulo 6, que se dedica por completo a este tipo de reacciones entre las pizarras utilizadas como árido y los álcalis contenidos en los cementos.

## **Capítulo 6: Reactividad álcali-árido de las pizarras en los morteros**

---



## 6.1. Introducción

En este capítulo se trata en profundidad la problemática que representa la reactividad que evidencian las pizarras cuando se encuentran en contacto con los álcalis de los cementos.

Se realiza un estudio exhaustivo de las 7 pizarras previamente seleccionadas, teniendo en cuenta su naturaleza predominantemente silíceo. Se comprueba, mediante varios métodos, la presencia de productos de la reactividad álcali-silíceo y álcali-silicato y se estudian las posibilidades de disminuir o incluso eliminar los efectos de dicha reactividad.

Por último, se analiza el comportamiento de las pizarras en las dosificaciones reales y con los cementos seleccionados en esta Tesis. Para ello se adapta el método acelerado en probetas de mortero para su uso con morteros reales.

## 6.2. Estudio de la reactividad de las pizarras

Para el aprovechamiento de los residuos de la industria extractiva de la pizarra en la fabricación de morteros se ha de asegurar la compatibilidad de esta con los cementos. Para ello se han efectuado un amplio número de ensayos, debido a la dificultad que entraña calificar a un árido como reactivo frente a los álcalis del cemento.

A continuación se incluyen los ensayos que se han realizado y los resultados obtenidos.

### 6.2.1. Determinación de la reactividad de las pizarras por el método químico

Como se explica en el capítulo 3, la base de este ensayo es el estudio de la evolución de una disolución de NaOH en contacto con el árido a estudiar. Se analiza la concentración en sílice y en sodio en la disolución a lo largo del tiempo.

#### 6.2.1.1. Preparación de las muestras

El ensayo se realiza sobre 7 muestras de pizarra de distintos orígenes. El material de partida se recoge en las propias canteras en forma de grandes "tochos" de las rocas por lo que lo primero que se hace es machacar el material hasta alcanzar los tamaños de árido establecidos en la norma. Para ello se utiliza una machacadora de mandíbulas de la marca PROETI y, debido a la naturaleza estratificada de las pizarras, se obtienen granos de diversos tamaños, muchos de ellos con formas planas lajosas.

Una vez machacado, el material se separa mediante tamizado en las tres fracciones que establece la norma, para luego componer la muestra a ensayar con los porcentajes indicados de cada fracción.

### 6.2.1.2. Tratamiento alcalino

De cada una de las muestras de pizarra preparadas, se pesan cuatro muestras de 25 gramos cada una, para hacerlas reaccionar durante 24, 48, 72 y 168 horas en recipientes de polipropileno.

Se añade a cada muestra 25 ml de NaOH 1 N, cerrando y colocando los recipientes en una estufa ventilada, regulada a 80 °C. En estas condiciones se dejan reaccionando las muestras durante los tiempos estipulados. Llegado el momento se saca el recipiente de la estufa y se enfría rápidamente bajo el grifo con agua corriente. Se filtra la disolución con papel de poro fino, se toman 10 ml de filtrado con una pipeta y se llevan a un matraz aforado de 200 ml que se enrasa hasta aforo con agua destilada. Cuando no se consiguen 10 ml de disolución, se toman 5 ml y se enrasan a 100 ml manteniendo así la misma dilución para todas las muestras.

### 6.2.1.3. Determinación de la sílice en disolución

La sílice disuelta se ha medido con un espectrofotómetro Hitachi U-2000 (Fig. 6.1) que permite medir en un rango de longitudes de onda desde 190 a 1100 nm para lo que cuenta con dos lámparas, una de deuterio (UV) y otra de tungsteno (VIS). En este caso se trabaja con una longitud de onda de 401,6 nm.

El método de espectroscopía ultravioleta-visible se basa en hacer incidir un haz de luz monocromático sobre la muestra coloreada de manera que, registrando la intensidad reflejada por la muestra, podemos conocer la absorbancia de esta, es decir, la capacidad de absorber la radiación incidente por parte de la sustancia problema.



Figura 6.1. Espectrofotómetro UV-VIS Hitachi U-2000

Para la medición de la sílice se necesita, en primer lugar, obtener una recta de calibrado con la que relacionar las medidas de las disoluciones problema. Para ello se preparan disoluciones patrón de sílice a partir de una ampolla normalizada de silicio. Al añadir los reactivos especificados en la norma las disoluciones adquieren una tonalidad amarillo-verdosa que aumenta en intensidad a medida que aumenta la concentración de sílice de la disolución patrón.

En el momento adecuado se mide la absorbancia introduciendo la muestra en una de las dos cubetas del espectrofotómetro. En la otra cubeta se mantiene una muestra en blanco que permanece en el equipo para que este tenga siempre una intensidad inicial,  $I_0$ , con la que calcular la absorbancia.

La recta de calibrado obtenida se muestra en la Figura 6.2.

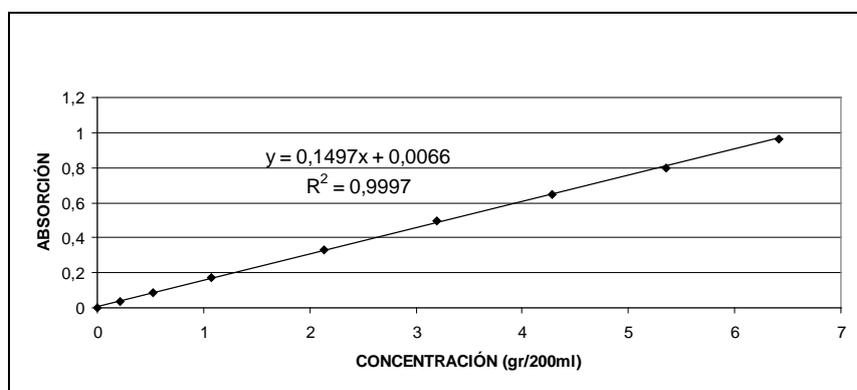


Figura 6.2. Recta de calibrado de sílice en disolución

Una vez obtenida la recta de calibrado de la sílice se ensayan partes alícuotas de las disoluciones problema según el método normalizado. Los resultados de concentración de sílice en disolución se incluyen en la Figura 6.3.

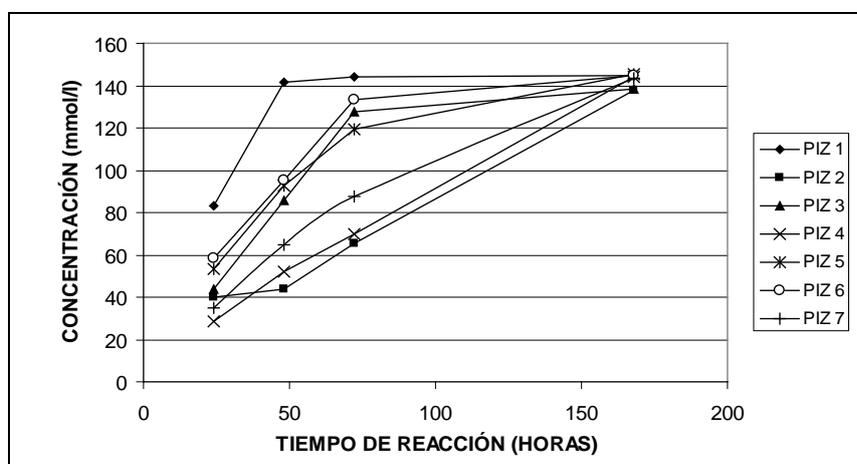


Figura 6.3. Concentración de sílice en disolución, método químico

#### 6.2.1.4. Determinación del sodio en disolución

Las disoluciones, obtenidas tras el tratamiento alcalino de las muestras, son también sometidas a la medida del sodio disuelto, de manera que se observa la posible disminución de sodio en disolución por inclusión de este en los silicatos alcalinos que se puedan formar durante la reacción.

Para la medida del sodio se emplea un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3300 que proporciona una llama aire-acetileno que alcanza aproximadamente los 2300 °C (Figura 6.4). Este equipo también permite trabajar midiendo energías de emisión atómica, técnica aconsejada para este elemento.

Estas temperaturas son suficientes, no solo para que los iones de sodio en la disolución pasen a átomos en estado fundamental, sino también para que algunos de estos átomos alcancen un estado electrónico excitado. La energía radiante emitida cuando los átomos regresan a su estado fundamental es proporcional a la concentración de este elemento en la disolución problema.

Para la detección de la energía emitida se utiliza un monocromador, con el que se aísla la radiación de longitud de onda de 589 nm, que proviene de la emisión de los átomos del sodio, y un fotomultiplicador, que detecta y amplifica la radiación que le llega. De esta forma determinamos la concentración de sodio en disolución por espectrofotometría de emisión atómica de llama.

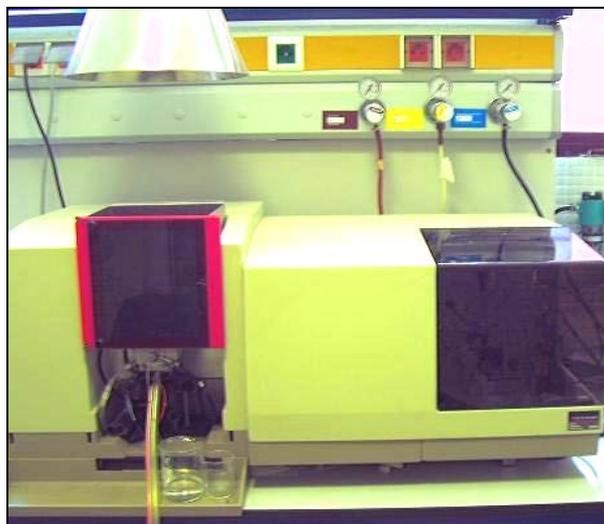


Figura 6.4. Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3300

En primer lugar se preparan disoluciones patrón del óxido para obtener una recta de calibrado. Esto se hace, según especifica la norma, disolviendo

cloruro de sodio de manera que se obtienen disoluciones de concentración conocida y creciente de sodio que se expresan en forma de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Estas disoluciones se ensayan nebulizándolas sobre la llama del espectrofotómetro y se obtiene la recta de calibrado de la Figura 6.5.

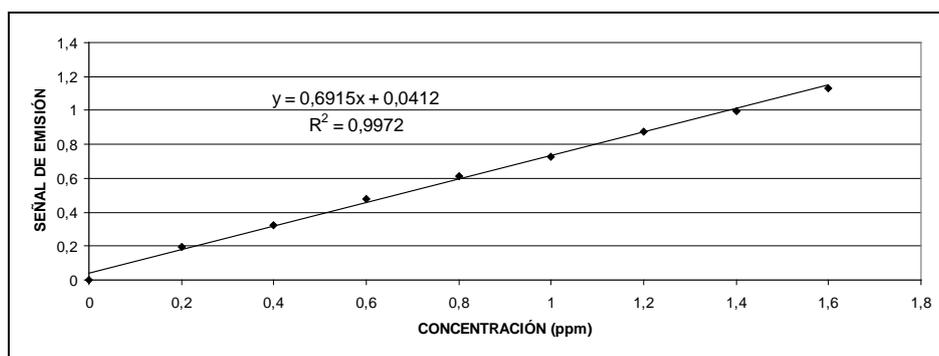


Figura 6.5. Recta de calibrado patrón de óxido de sodio

Una vez obtenida la recta patrón se analizan las disoluciones problema resultando concentraciones del mismo orden, tanto entre todas las muestras ensayadas como respecto a la concentración inicial que se añade en forma de hidróxido sódico. Los resultados se incluyen en el gráfico de la Figura 6.6.

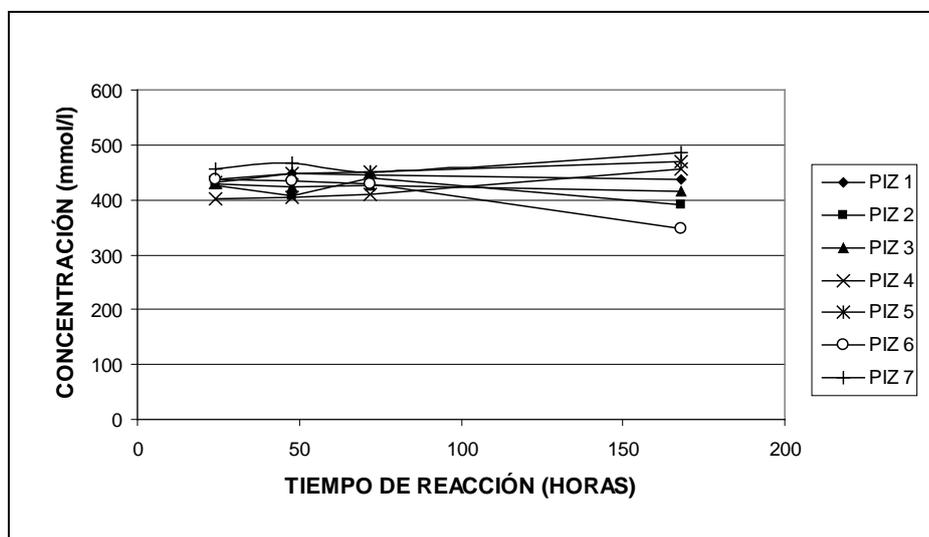


Figura 6.6. Concentraciones de óxido de sodio en disolución, método químico

### 6.2.1.5. Evaluación de la reactividad potencial del árido

Con los resultados de la determinación de sílice y óxido de sodio se procede al cálculo de la relación molar  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  a las diferentes edades en las que

se hace reaccionar cada pizarra. Se representan estas relaciones en función del tiempo (cinética de reacción) y se obtiene el gráfico de la Figura 6.7, en el que también se incluyen las tres zonas diferenciadas para clasificar el árido ensayado como no reactivo (zona A), potencialmente reactivo (zona B) o potencialmente reactivo con efecto pésimo (zona C).

Se observa en el gráfico que todas las líneas transcurren en la zona A del mismo, lo que las clasifica como no reactivas, aunque las pizarras 1 y 6 en las primeras horas de reacción caen en la zona B del gráfico, siendo la curva de la pizarra 1 la que se introduce más, con diferencia en la zona que clasifica el árido como potencialmente reactivo.

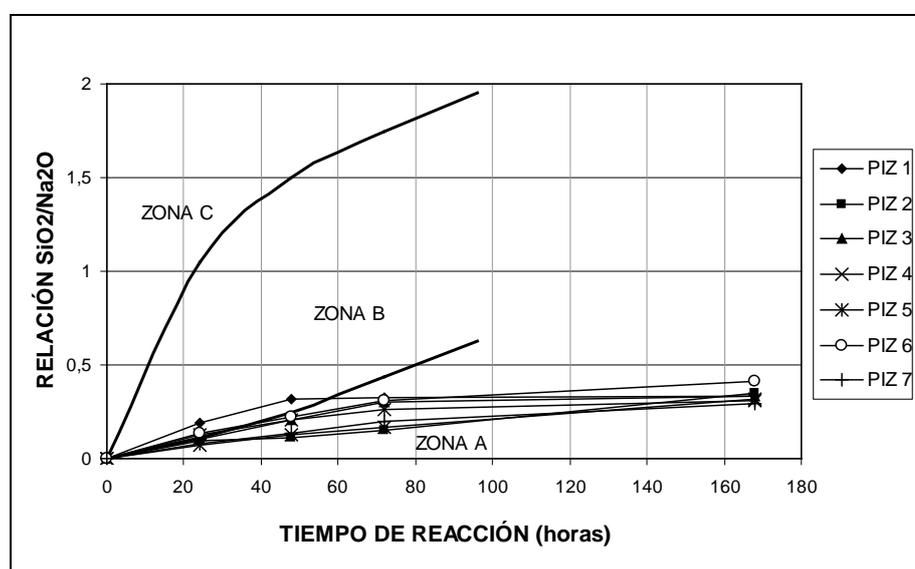


Figura 6.7. Relación entre concentraciones de óxidos de silicio y sodio en disolución

Los datos que se obtienen conducen a clasificar las siete pizarras ensayadas como no reactivas, sin embargo se deben tener en cuenta varios aspectos. En primer lugar cabe destacar las altas concentraciones de sílice medidas en las disoluciones de las siete muestras ensayadas. Estas concentraciones están en consonancia con los resultados reflejados en estudios realizados a este tipo de rocas<sup>119</sup> e indican que las pizarras en medio básico se disuelven parcialmente apareciendo silicatos en las disoluciones de ataque.

<sup>119</sup> Fournier, B., Chevrier, R., de Grosbois, M., Lisella, R., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M., Thomas, M., Baxter, S. The accelerated concrete prism test (60 °C): variability of the test method and proposed expansion limits. Proc. 12th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China. 1 (2004):314–323.

El fenómeno de disolución se atribuye a la existencia de fases silíceas, principalmente cuarzo, de bajo índice de cristalinidad, es decir, compuestas por cristales muy pequeños y/o sometidos a deformaciones de presión, lo que favorece su solubilidad.<sup>51, 120</sup>

El método químico normalizado utilizado como referencia en este estudio indica un tiempo máximo de reacción entre las muestras y las disoluciones alcalinas de hasta 3 días (72 horas). En este trabajo se ha alargado el tiempo de reacción hasta los 7 días (168 horas) para posibilitar que se diera la reacción incluso en las muestras que pudieran reaccionar más lentamente (cinética lenta).

En la Figura 6.3 se representan las líneas de concentración de sílice en disolución en los distintos tiempos de reacción pudiéndose distinguir dos tendencias diferentes en el proceso de disolución. Por un lado, las muestras PIZ 1, PIZ 3, PIZ 5 y PIZ 6 reaccionan con relativa rapidez durante los primeros tres días, para luego disminuir de forma notable el incremento en concentración de sílice en los días posteriores. Esto se refleja en sus líneas curvas con marcados puntos de inflexión.

En el caso de las pizarras PIZ 2, PIZ 4 y PIZ 7 las líneas del gráfico son, prácticamente, rectas ascendentes de pendiente constante, lo cual indica una cinética de reacción más lenta pero constante en todo el tiempo del ensayo y da a entender que, de haber continuado con el ensayo, las cantidades de sílice disueltas serían mayores que las del resto de las muestras.

Las diferencias existentes en las reactividades de las piezas estudiadas se pueden atribuir al diferente grado de metamorfismo de estas. Las filitas, de grado de metamorfismo más bajo, menos compactas y de estructura más débil, serían más fácilmente atacables por parte de la solución alcalina que los esquistos, de grado de metamorfismo mayor y más compactos.

En cualquier caso la concentración de sílice disuelta en las muestras no deja de aumentar, en mayor o menor grado, hasta que paramos la reacción (excepto para la PIZ 1 en la que, a partir del tercer día, la concentración se mantiene más o menos constante). Este comportamiento induce a pensar que el método químico no es muy adecuado para este tipo de rocas, ya que se obtienen diferentes resultados en función de una cinética más rápida o más lenta de la reacción aunque, a la larga, todas las muestras sufrieran ese ataque.

---

<sup>120</sup> Wakizaka, Y. Alkali-silica reactivity of Japanese Rocks. *Engineering Geology*. 56 (2000): 211-221.

Las concentraciones de sodio durante las reacciones se incluyen en el gráfico de la Figura 6.6, donde se puede ver que estas no varían en exceso manteniéndose en valores entre 400 y 500 mmol/L todas ellas excepto en el caso de la PIZ 6. Estas concentraciones se encuentran muy próximas a la concentración inicial de 500 mmol/l en Na<sub>2</sub>O de la disolución de ataque.

En el proceso de disolución de sílice en medio alcalino se forma, en la superficie de la pizarra, un silicato alcalino hidratado parcialmente disuelto en el líquido. Este fenómeno provoca que en la disolución aparezca la sílice disuelta y provocaría una disminución de la cantidad del álcali, sodio en nuestro caso, en la disolución debido a que parte de éste queda atrapado en el silicato hidratado formado en la superficie del árido.<sup>36</sup> Esta disminución se vería reflejada en el gráfico de la Figura 6.6 con líneas de pendiente negativa y en el gráfico de la Figura 6.7 con un aumento en la relación SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O que podría cambiar la clasificación de las muestras de “no reactivas” a “potencialmente reactivas”.

Como se ha indicado anteriormente, la fase silíceas que principalmente se disuelve en el caso de las pizarras es el cuarzo, debido a su bajo índice de cristalinidad. Sin embargo hay trabajos que demuestran que también se produce disolución parcial de otras fases silíceas, como las micas, lo que conlleva una liberación de álcalis de la red silíceas a la disolución.<sup>53</sup> Este fenómeno produciría una aparición de cationes potasio, K<sup>+</sup>, abundante en estas pizarras, en las disoluciones. El potasio se incorporaría más rápidamente a los silicatos hidratados que el sodio,<sup>121</sup> lo que justificaría la baja disminución de la concentración de sodio en la formación de los silicatos alcalinos.

De nuevo se observan inconvenientes en este método ya que, cuando se ensayan agregados compuestos por diversos minerales, la concentración de álcalis en la disolución se puede ver afectada por el aporte de estos minerales trastocando, de manera importante, la relación de óxidos que proporciona la catalogación final de la reactividad de esas muestras.

El método químico tiene, por tanto, dos importantes limitaciones: por un lado, en el relativamente corto tiempo de ensayo no todos los áridos liberan a la disolución la cantidad total de sílice que aportarían de alargarse este tiempo e, incluso para ciertos agregados, como es el caso del ópalo, la cantidad de disolución alcalina que se aporta no es suficiente para disolver toda la sílice reactiva del mineral.<sup>56</sup>

---

<sup>121</sup> Duchesne, J., Bérubé, M.A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanisms. Part 2: Pore solution chemistry. Cement and Concrete Research. Vol. 24, No. 2 (1994) pp. 221-230.

Por otro lado el aporte de álcalis por parte de los áridos puede falsear la medida del sodio en disolución, haciendo que esta sea mayor a la esperada. Estas limitaciones hacen que, como algunos autores indican, este método solo sea apropiado para identificar áridos muy reactivos, con cinética rápida, y que, en el caso de áridos clasificados como no reactivos según este ensayo, se deban aplicar otras técnicas que confirmen este resultado.

## 6.2.2. Reactividad de las pizarras por el método acelerado en probetas de mortero

### 6.2.2.1. Preparación de las muestras

El punto de partida en este ensayo, como en el anterior, son las muestras de pizarra machacadas, mediante machacadora de mandíbulas, y clasificadas por tamaños, mediante tamizado y posterior lavado. En este caso se obtienen 5 fracciones de cada muestra con las que, posteriormente, se recompone el árido que se incluirá en el mortero a ensayar, con los porcentajes señalados en la norma.

### 6.2.2.2. Preparación de las probetas de mortero

Las fracciones de árido utilizadas son 2,5-5 mm, 1,25-2,5 mm, 0,630-1,25 mm, 0,315-0,630 mm, 0,160-0,315 mm, y con ellas se componen los 900 gramos de árido que se van a mezclar con 400 gramos de cemento dando lugar a un mortero con una parte de cemento por cada 2,25 partes de árido.

El cemento que utilizamos es del tipo CEM I 52,5 R, de la cementera Portland Valderrivas, y su composición química y superficie específica son las que se indican en la Figura 6.8.

FLUORESCENCIA RX (%)			
SiO <sub>2</sub>	19,26	MgO	3,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,51	SO <sub>3</sub>	3,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,21	Na <sub>2</sub> O	0,12
CaO	63,55	K <sub>2</sub> O	0,94
SUPERFICIE ESPECIFICA BLAINE		Na <sub>2</sub> O equivalente	
4470 cm <sup>2</sup> /g		0,73	

Figura 6.8. Composición química y superficie específica del CEM I 52,5 R

En cuanto a la cantidad de agua a añadir a los morteros, la norma indica que se utilice una relación agua/cemento de 0,47 en peso. Con esta relación agua/cemento el mortero hecho con pizarra queda excesivamente seco y con

una trabajabilidad escasa. En estos casos la norma observa que se debe utilizar una cantidad de agua suficiente para obtener morteros que alcancen consistencias entre 105 y 120 mm en el ensayo de consistencia de mortero en mesa de sacudidas según la norma UNE 83811<sup>122</sup>.

En el caso de las pizarras las relaciones agua/cemento se han aumentado para obtener una mínima trabajabilidad a la hora de realizar las probetas, encontrándose todas entre  $a/c = 0,50$  de la PIZ 3 y  $a/c = 0,58$  de la PIZ 2.

Para la realización de las probetas se amasa el mortero según la norma UNE-EN 196-1<sup>123</sup> y se añade en el molde llenando las cavidades con dos capas y compactando el material en cada capa mediante un pisón manual, con el que se trabajan especialmente las esquinas y alrededor de las inserciones metálicas que se incluyen en los dos extremos de cada probeta (Figura 6.9).

La norma indica que se debe compactar el mortero hasta obtener una probeta homogénea pero no especifica más, con lo que la compactación del material dependerá, en cierta medida, del analista que realiza el ensayo.



Figura 6.9. Molde de 25x25x285 mm<sup>3</sup> con inserciones metálicas

Esto podría suponer una fuente de incertidumbre a este método, ya que los resultados podrían verse afectados, en parte, por el analista. En el presente trabajo las capas se han compactado con 70-80 golpes cada una, distribuidos a lo largo de toda la muestra pero con más incidencia en los extremos, alrededor de las inserciones metálicas.

---

<sup>122</sup> UNE 83811:1992 EX Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de sacudidas (método de referencia). Asociación Española de Normalización y Certificación (1992).

<sup>123</sup> UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. Asociación Española de Normalización y Certificación (2005).

Una vez que se ha compactado la última capa se retira el sobrante con una regla plana y se lleva el molde a la cámara húmeda donde permanecerá  $24 \pm 2$  horas a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa del 95%. En la Figura 6.10 se observa el aspecto del molde recién rellenado con el mortero.

Este proceso se lleva a cabo con las 7 muestras de pizarra.

### 6.2.2.3. Realización del ensayo y resultados

Las probetas de mortero se desmoldan transcurridas las 24 horas en cámara húmeda. Se miden sus longitudes y se introducen en contenedores de polipropileno con agua a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de manera que queden completamente cubiertas.

Se mantienen en estufa durante otras 24 horas, pasadas las cuales se vuelven a medir y se introducen, de nuevo, en los contenedores, pero ahora con hidróxido sódico 1 N a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figura 6.10. Molde de acero y probetas de mortero recién preparadas

En este medio pasarán los siguientes días, midiéndose su longitud en varias ocasiones (Figura 6.11), aproximadamente a la misma hora del día, hasta los 14 días, fecha en la que, según el porcentaje de alargamiento de las probetas, se procede a clasificar los áridos que las componen como reactivos o no. Para una mayor seguridad en los resultados se continúa con el procedimiento hasta los 28 días de inmersión de las probetas.

Para evaluar la potencial reactividad del árido ensayado, se expresan los datos de incrementos de longitud frente al tiempo en un gráfico (Figura 6.12). La norma indica que una expansión menor de 0,1% a los 14 días permite considerar al árido como no reactivo, mientras que una expansión superior a 0,2% corresponde a un árido potencialmente reactivo. Si la expansión se encuentra entre los dos valores anteriores se continúa la reactividad hasta los

28 días, fecha en la que, si la expansión es mayor a 0,20 indica un árido potencialmente reactivo.

Figura 6.11. Medición de las probetas mediante equipo con micrómetro

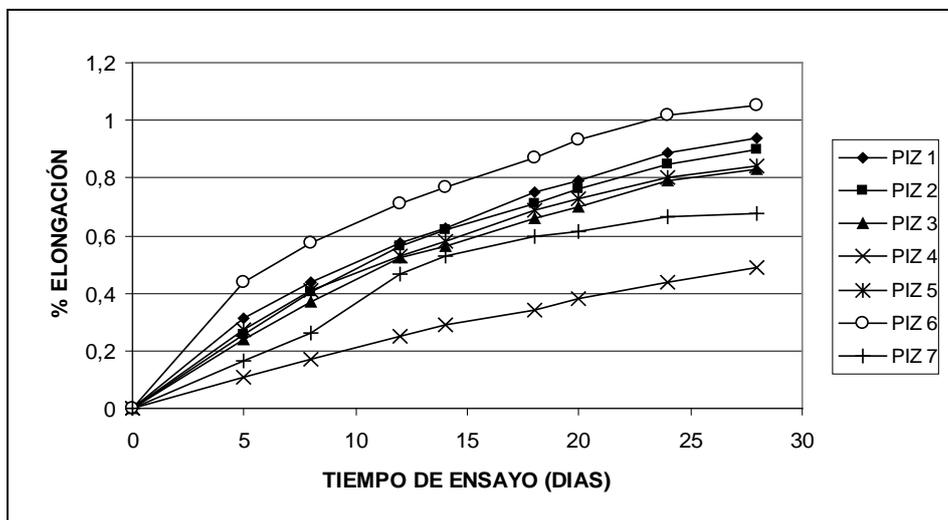


Figura 6.12. Gráfico elongación-tiempo de ensayo. Ensayo acelerado en probetas de mortero

En el caso de las pizarras se observa, claramente, que ya a los 14 días todos los morteros han superado ampliamente la expansión de 0,2% lo cual, según la norma, indica que todas las muestras estudiadas son potencialmente reactivas.

El método acelerado de probetas de mortero sugiere una alta reactividad de las pizarras ensayadas. En el gráfico se puede observar que ya a los 5 días de ensayo todas las muestras superan el límite de elongación máximo de las probetas a los 14 días de ensayo, que es del 0,1%.

Aunque todas las elongaciones alcanzadas a los 28 días son bastante elevadas, hay diferencias apreciables entre las 7 muestras. De nuevo se ve, como en el ensayo químico, que las filitas, de menor grado de metamorfismo, han reaccionado alcanzando las mayores elongaciones, mientras que los esquistos PIZ 4 Y PIZ 7 se desvían a elongaciones finales apreciablemente menores. De manera excepcional ha reaccionado el esquisto PIZ 2 que se sitúa como la tercera muestra que mayor elongación ha alcanzado.

La validez de los resultados expuestos en este punto está sujeta a la fiabilidad del método utilizado para obtenerlos. Varios investigadores plantean ciertas limitaciones que ponen en duda la capacidad del método acelerado de probetas de mortero para catalogar los áridos como reactivos o no reactivos. Ya se ha comentado anteriormente que la principal objeción a este método es su "severidad", ya que los materiales se exponen a condiciones extremas que no se corresponden con las situaciones en las que esos materiales se encontrarán normalmente, de tal modo que áridos que se comportan correctamente en sus ambientes de exposición normales son identificados como reactivos de acuerdo a este ensayo.<sup>104, 124</sup> Teniendo en cuenta esto último el método sería apropiado para designar áridos como no reactivos, sobre todo si se alarga el tiempo de ensayo hasta 28 días en previsión de que se ensayen materiales cuya cinética de reacción pudiera ser extremadamente lenta, mientras que los áridos clasificados como reactivos, como es el caso de estas pizarras, deberían ser verificados mediante otros métodos.

Otra limitación de este método sería la preparación de las probetas. La relación agua/cemento para tener una consistencia trabajable del mortero puede afectar al desarrollo de la reacción álcali-árido y a la elongación de las probetas.

---

<sup>124</sup> Shon, Chang-Seon., Zollinger, Dan G., Sarkar, Shondeep L. Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*. 32 (2002) 1981-1987.

Se ha comprobado empíricamente con morteros hechos con PIZ-3 con distintas relaciones agua/cemento que, aunque la mayor o menor consistencia del mortero afecta al desarrollo de las expansiones, este hecho no es decisivo ya que las curvas de todas las muestras son similares y las elongaciones alcanzadas muy aproximadas. Los resultados de esta prueba se expresan gráficamente en la Figura 6.13.

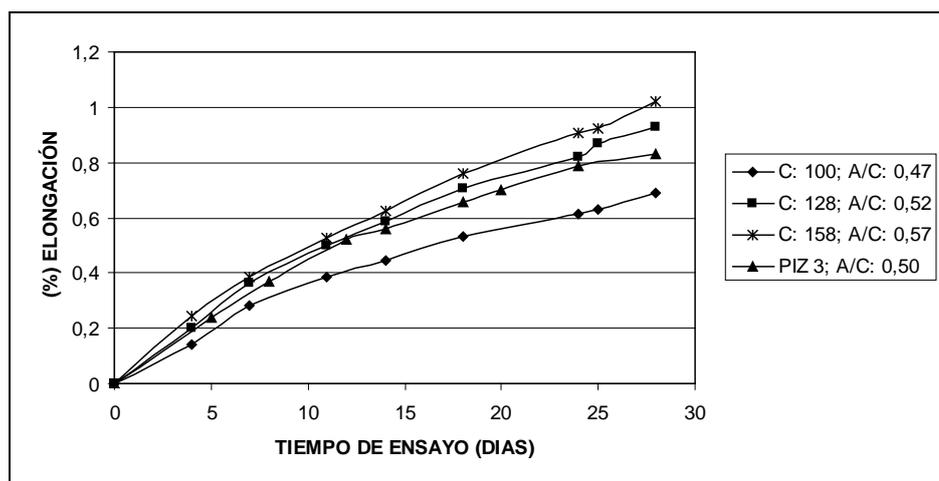


Figura 6.13. Elongación frente a tiempo en ensayo de morteros con PIZ 3, de distinta relación A/C y consistencia (C) (expresada en mm)

En el gráfico de la Figura 6.13 se evidencia que la consistencia y compactación del mortero ensayado deben tenerse en cuenta ya que cuanto más fluido es el mortero mayores son las elongaciones de las probetas ensayadas. Este comportamiento podría deberse a que se consiguen compactaciones más eficaces con lo que en el interior del mortero los poros y capilares son más pequeños y los geles expansivos ejercen antes y con más fuerza las tensiones que producen la expansión del material. Por otro lado esta disminución de porosidad y permeabilidad dificultaría el movimiento de líquidos en el interior del mortero y con el exterior con lo que el agua, necesaria para que se dé la reacción, se introduciría con mayor dificultad en el mortero. En este ensayo las probetas permanecen siempre inmersas en disolución con lo que se garantizan las disoluciones en los poros del mortero.

#### 6.2.2.4. Inspección visual de las probetas de mortero

Un análisis visual de las probetas pasado el tiempo de reacción permite apreciar en todas ellas un agrietamiento en su superficie, con toda probabilidad, resultado de las tensiones de expansión a las que se han visto

sometidas durante el ensayo. En la Figura 6.14 se incluyen algunas imágenes de las probetas ensayadas y los desperfectos superficiales que presentan.

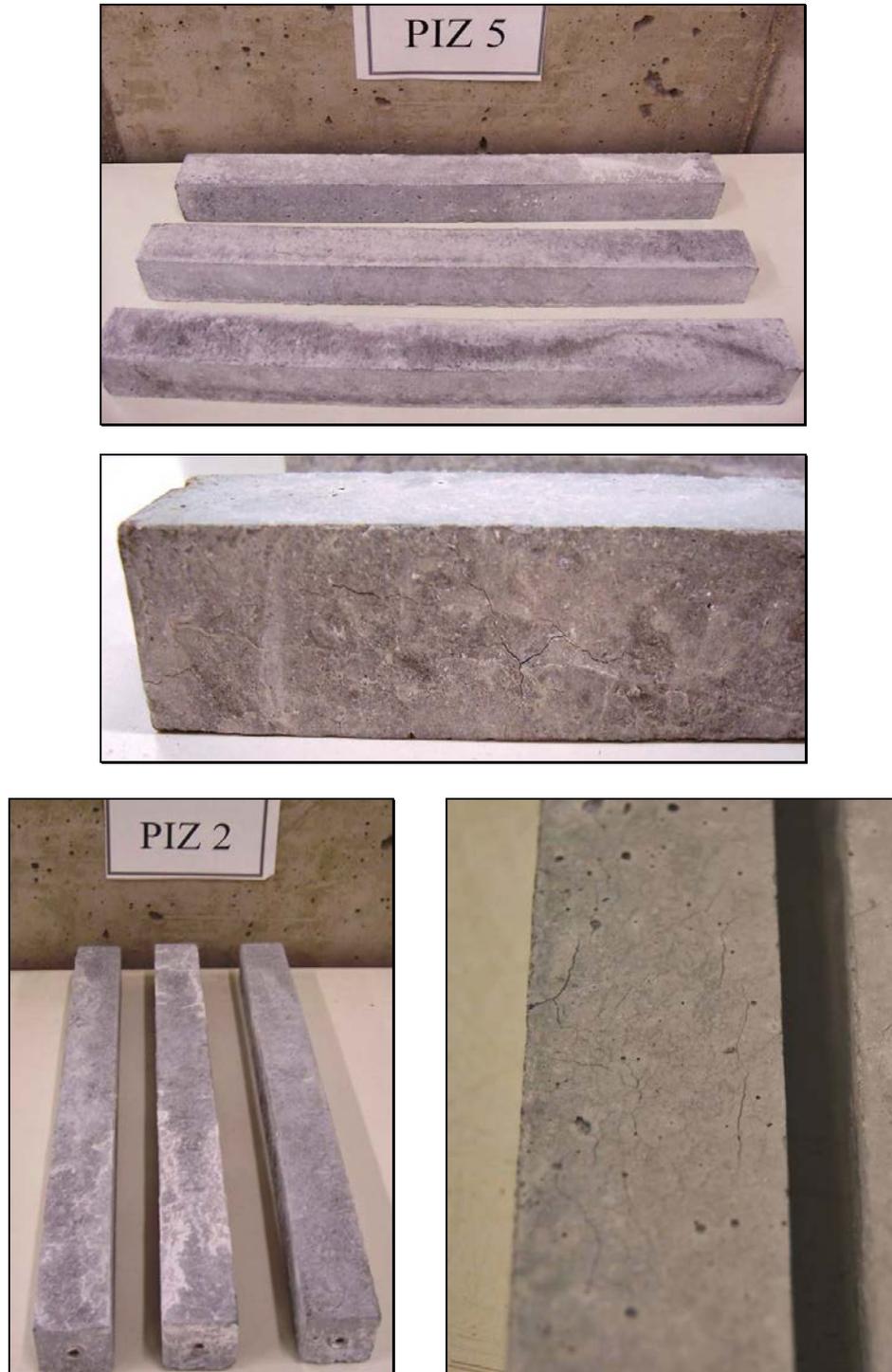


Figura 6.14. Probetas de mortero ensayadas mediante el método acelerado de probetas de mortero. Detalles de desperfectos superficiales que presentan

Las probetas se rompen para obtener muestras para su observación bajo microscopio óptico y posteriormente para su estudio mediante microscopía electrónica.

La observación con microscopio óptico permite ver estructuras en el interior de poros y grietas así como sobre la superficie de los granos de pizarra. Algunas de esas estructuras corresponden morfológicamente con los gels silicalcalcalinos, responsables de la aparición de grietas en las probetas de mortero.

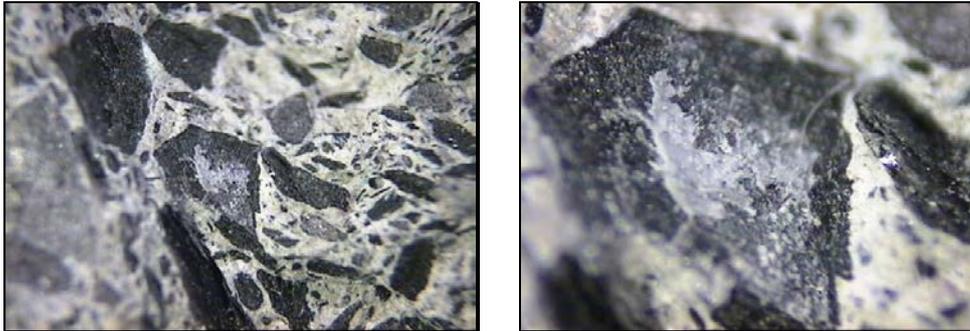


Figura 6.15. Gel depositado en la superficie de la pizarra en el mortero con PIZ 1

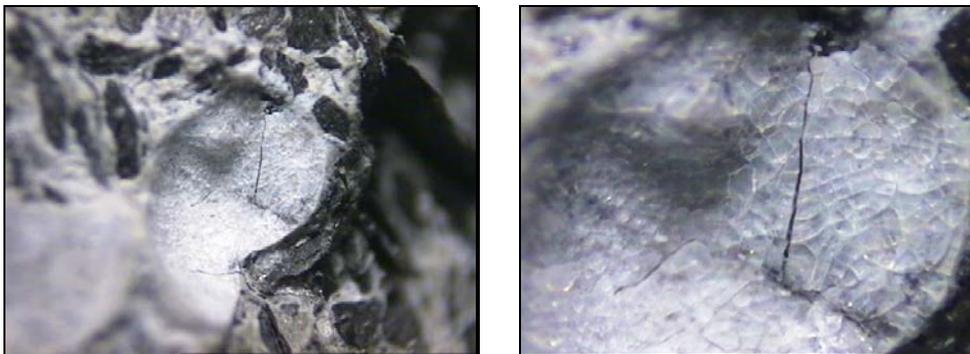


Figura 6.16. Gel liso transparente en interfase grano-pasta de cemento en mortero con PIZ 3 (se observa agrietamiento de la pasta de cemento).

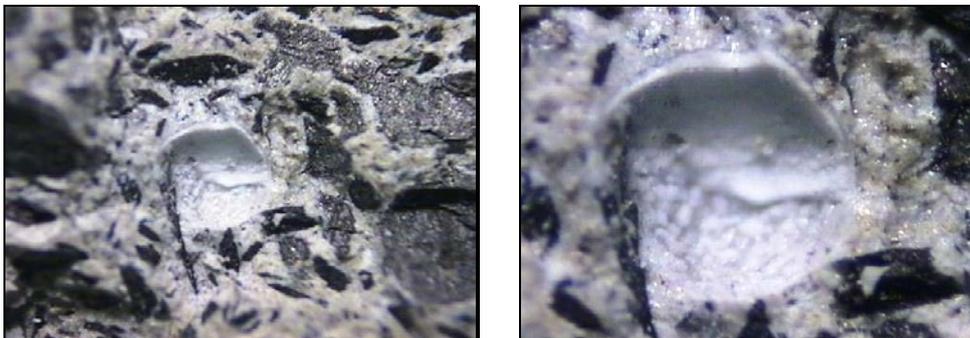


Figura 6.17. Depósito blanco en un poro en el mortero de PIZ 1

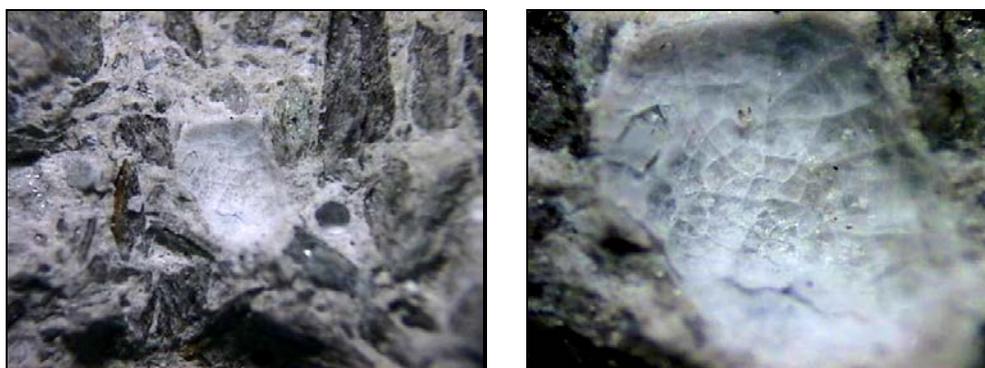


Figura 6.18. Gel liso transparente en interfase grano-pasta de cemento en mortero con PIZ 7.

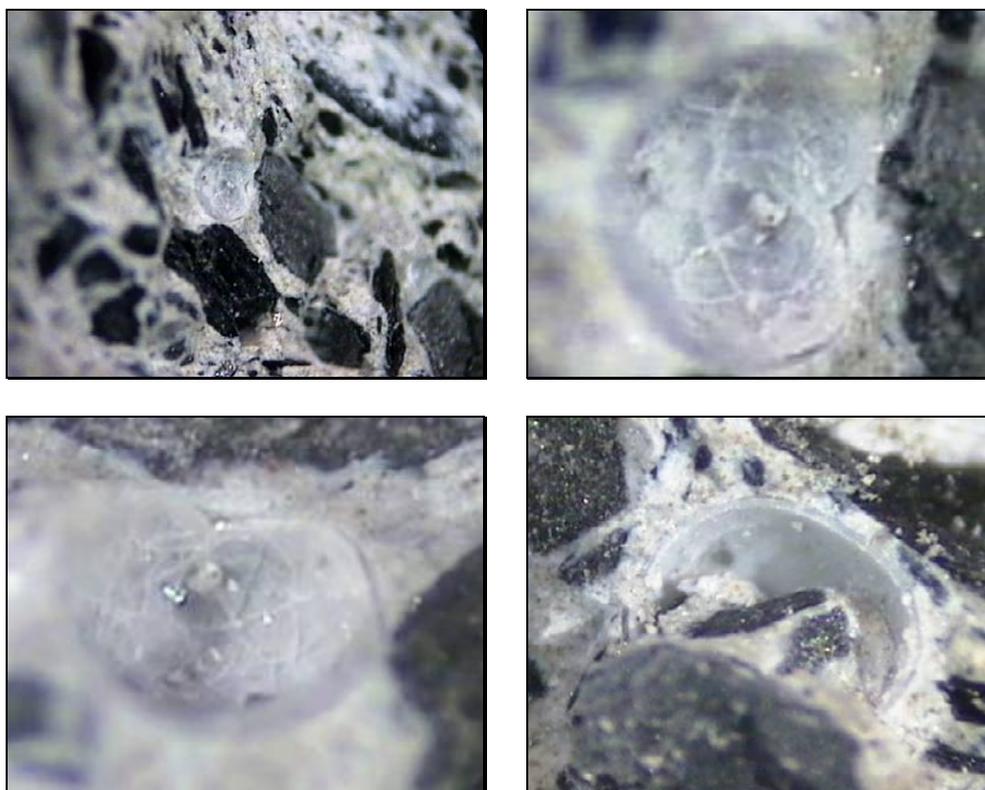


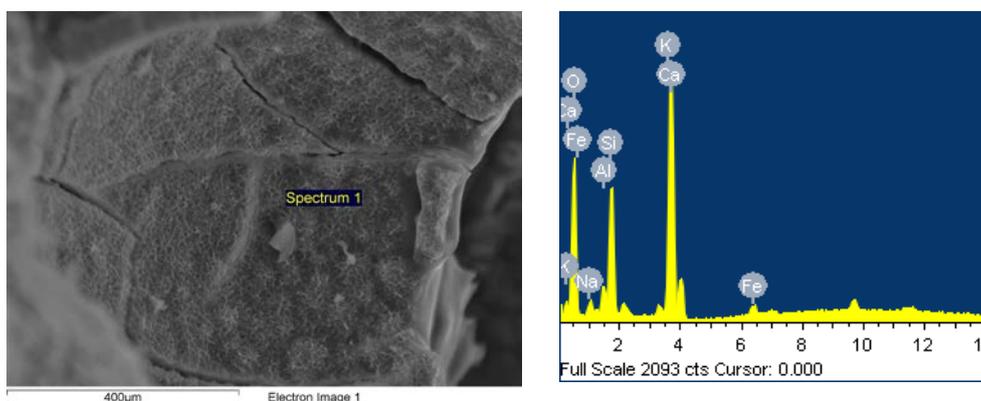
Figura 6.19. Geles lisos transparentes en poros en mortero con PIZ 5

#### 6.2.2.5. Análisis SEM-EDX de las probetas de mortero

Para el examen se toman pequeñas muestras de los morteros, se metalizan con recubrimiento de oro y se examinan con el microscopio electrónico de barrido haciendo análisis puntuales por dispersión de rayos X de las zonas de interés.

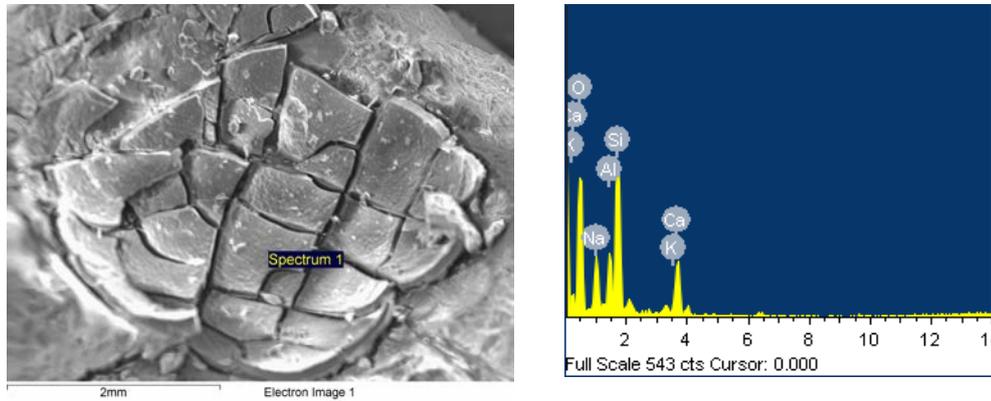
Al estudiar las muestras se encuentran, en todas ellas, formaciones que corresponden a los geles silicocalcoalcalinos, a los que se les atribuye la capacidad de producir las expansiones observadas en el método acelerado de probetas de mortero. El análisis de rayos X indica que estas formaciones están compuestas, básicamente, por sílice y óxidos de calcio, sodio y potasio, elementos constituyentes de los geles referidos anteriormente.

Algunas de las estructuras encontradas se incluyen a continuación acompañadas por sus análisis de dispersión de rayos X.



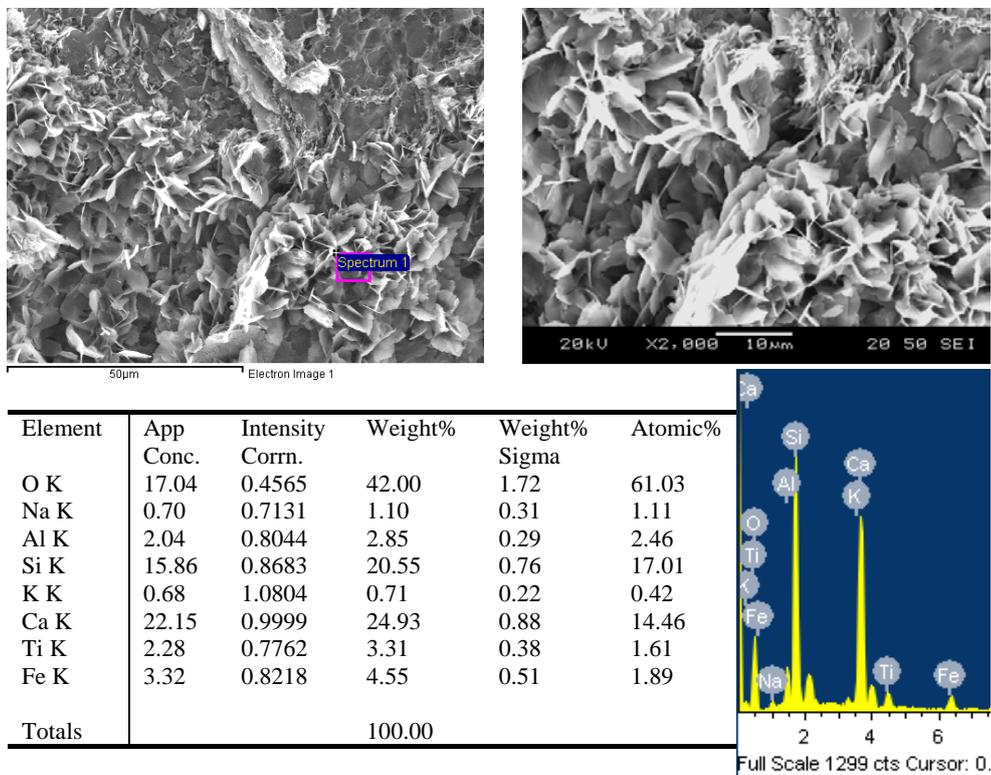
Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	45.49	0.5779	60.51	0.53	77.20
Na K	1.42	0.6563	1.66	0.17	1.47
Al K	1.87	0.7543	1.91	0.11	1.44
Si K	9.56	0.8373	8.78	0.18	6.38
K K	1.14	1.1063	0.79	0.09	0.41
Ca K	31.34	1.0031	24.02	0.35	12.23
Fe K	2.46	0.8114	2.33	0.23	0.85
Totals			100.00		

Figura 6.20. Formaciones en escamas sobre gel liso en mortero con PIZ 7



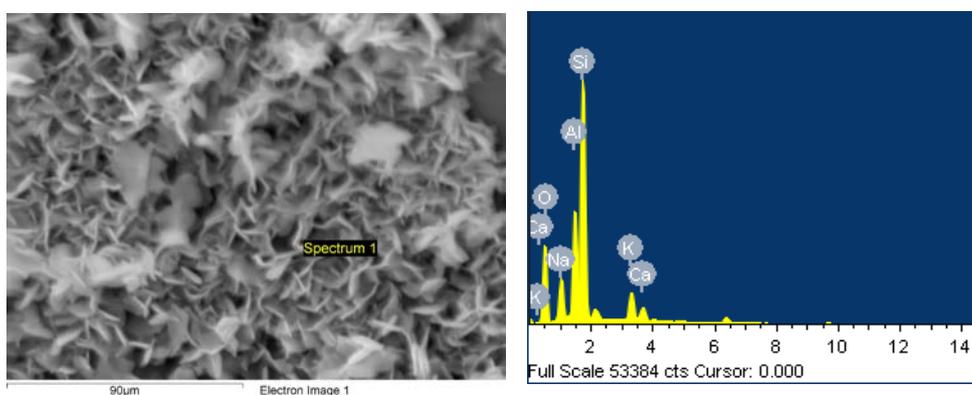
Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	10.49	0.8772	57.96	1.09	70.98
Na K	1.52	0.7970	9.26	0.59	7.89
Al K	0.97	0.7686	6.15	0.40	4.46
Si K	2.86	0.7976	17.38	0.62	12.12
K K	0.22	1.0184	1.05	0.22	0.53
Ca K	1.63	0.9630	8.21	0.42	4.01
Totals			100.00		

Figura 6.21. Geles lisos de gran grosor en mortero con PIZ 5



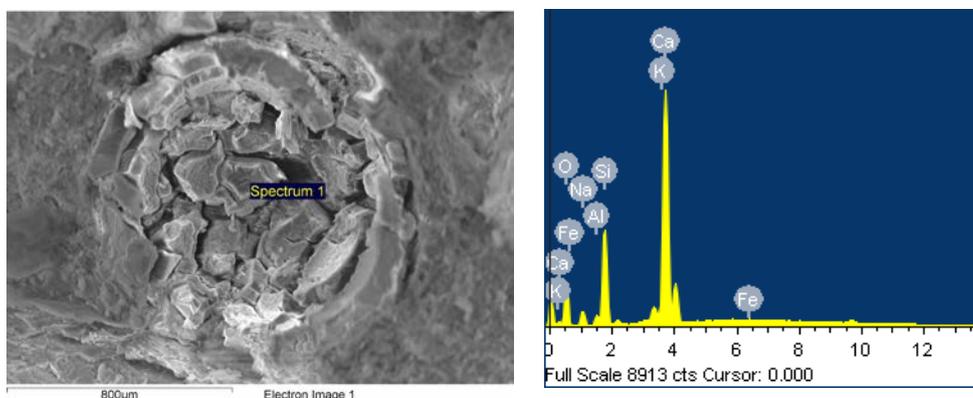
Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	17.04	0.4565	42.00	1.72	61.03
Na K	0.70	0.7131	1.10	0.31	1.11
Al K	2.04	0.8044	2.85	0.29	2.46
Si K	15.86	0.8683	20.55	0.76	17.01
K K	0.68	1.0804	0.71	0.22	0.42
Ca K	22.15	0.9999	24.93	0.88	14.46
Ti K	2.28	0.7762	3.31	0.38	1.61
Fe K	3.32	0.8218	4.55	0.51	1.89
Totals			100.00		

Figura 6.22. Gel en escamas en mortero con PIZ 1



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	586.72	0.7714	42.38	0.13	56.27
Na K	128.69	0.9572	7.49	0.05	6.92
Al K	188.48	0.8751	12.00	0.05	9.45
Si K	454.01	0.8091	31.27	0.09	23.65
K K	82.66	0.9710	4.74	0.04	2.58
Ca K	35.11	0.9216	2.12	0.03	1.13
Totals			100.00		

Figura 6.23. Gel en escamas en mortero con PIZ 2



Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	46.69	0.3681	42.17	0.48	61.77
Na K	6.86	0.7037	3.24	0.10	3.30
Al K	2.41	0.7774	1.03	0.05	0.90
Si K	29.38	0.8702	11.23	0.14	9.37
K K	6.40	1.1495	1.85	0.08	1.11
Ca K	121.40	1.0136	39.83	0.35	23.28
Fe K	1.58	0.8111	0.65	0.16	0.27
Totals			100.00		

Figura 6.24. Gel liso grueso en mortero con PIZ 3

### 6.2.3. Reactividad potencial por el método de los prismas de hormigón

Este método se ha postulado como uno de los más fiables en cuanto a la predicción del comportamiento de un árido frente a los álcalis de los cementos en un hormigón o mortero. Se han realizado ensayos comparativos de un gran número de áridos en prismas de hormigón frente al comportamiento de estos áridos en bloques de hormigón expuestos a la intemperie durante más de 10 años. Se obtiene una buena correlación entre las expansiones por reactividad de los prismas a los dos años de ensayo y las expansiones de los bloques de hormigón conservados 10 años a la intemperie.<sup>125</sup>

Pero, al igual que los métodos de ensayo anteriores, el método de los prismas de hormigón presenta inconvenientes: la duración del ensayo es muy elevada. Se requiere al menos un año para verificar la idoneidad de un árido para su uso en hormigones y morteros. El tiempo de ensayo se eleva a dos años si lo que se pretende es evaluar medidas preventivas en el control de las expansiones, como el uso de adiciones, cenizas volantes o escorias, o el uso de compuestos de litio.

Otro problema que presenta este método es que, durante el proceso, se condensa agua en la superficie de las probetas que puede extraer parte de los álcalis del hormigón por lixiviación. Esto se verifica mediante el análisis del agua del fondo de los recipientes de ensayo observándose un incremento paulatino en la concentración de sodio en ella. Este fenómeno de lixiviación implica la necesidad de introducir una alta concentración de álcalis (1,25% de  $\text{NaOH}_{\text{equiv}}$  en peso de cemento) en el hormigón a ensayar, lo que provoca que el método se vuelva demasiado severo. No se conocen áridos que, habiendo pasado este ensayo, hayan dado problemas en hormigones puestos en obra, mientras que, algunos áridos con buenos comportamientos en hormigones a la intemperie, se identifican como potencialmente reactivos mediante este test.<sup>126</sup>

---

<sup>125</sup> Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C., Chevrier, R. Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete, in: Tang Mingshu, Deng Min (Eds.), Proc. 12th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, vol. 1, International Academic Publishers/World Publishing Corporation, Beijing, 2004.

<sup>126</sup> Berube, M. A., Durand, B., Vezina, D., Fournier, B. Alkali-aggregate reactivity in Quebec (Canada). Canadian Journal of Civil Engineering. 27 (2000):226–245.

En este capítulo se evalúa la reactividad potencial de las pizarras como árido fino para la fabricación de morteros. Para hacer esto mediante el método de los prismas de hormigón se debe completar la curva granulométrica de los áridos con un material que no presente reactividad.

En este caso se van a fabricar probetas de hormigón con un árido de referencia teóricamente no reactivo. El hormigón tendrá la composición que especifica la norma.

Posteriormente se repiten las dosificaciones sustituyendo la fracción fina del árido, la arena de tamaño menor a 5 mm., por las pizarras que se van a ensayar. La granulometría de estas fracciones será la especificada en el ensayo acelerado en probetas de mortero. Así, partiendo de la pizarra machacada, lavada y separada por tamaños, se recompone la fracción fina del árido que se va a incluir en el hormigón.

El árido que se va a utilizar para la realización de este ensayo es un árido silíceo de gravera facilitado por la empresa Gravas y Hormigones Saiz S.A. de Burgos, cuyas características, incluidas en la ficha de marcado CE del producto, se especifican en la Figura 6.26 y 6.27.

ENSAYOS		VALOR
Densidad de partículas	Mg/m <sup>3</sup>	2,6
Coefficiente de Absorción de agua	%	<1
Índice de Equivalente de Arena		>75
Pasa por el tamiz 0,063 mm	%	≤3
Coefficiente de friabilidad		10
Terrones de arcilla	%	0
Contaminantes ligeros	%	0,00
Durabilidad frente a la reactividad álcali-sílice		No reactivo
Contenido en cloruros	%	<0,01
Sulfatos solubles en ácido	%	≤0,2
Azufre total	%	0

Figura 6.26. Características del arido fino facilitadas por el fabricante

ENSAYOS		Gc90/15	Gc85/20
Tamaño de las partículas	(d/D)	4/12	10/20
Índice de Lajas		3,5	3,5
Coeficiente de forma		0,26	0,26
Densidad de partículas	Mg/m <sup>3</sup>	2,6	2,6
Coeficiente de Absorción de agua	%	<1	<1
Finos por el tamiz 0,063 mm	%	<1,5	<1,5
Fragmentación Los Ángeles		≤25	≤25
Resistencia al pulimento CPA		≥43	≥43
Desgaste Micro-Deval		≤10	≤10
Partículas blandas	%	<0,15	<0,15
Terrones de arcilla	%	<0,1	<0,1
Contaminantes ligeros	%	0,00	0,00
Reactividad álcali-sílice		No reactivo	No reactivo
Contenido en cloruros	%	<0,01	<0,01
Sulfatos solubles en ácido	%	≤0,2	≤0,2
Azufre total	%	0	0

Figura 6.27. Características de los áridos gruesos facilitados por el fabricante

El cemento utilizado para la fabricación del hormigón es el mismo que el usado en el ensayo acelerado en probetas de mortero y cuya composición se encuentra en la Figura 2.13. Es un CEM I 52,5 R con una concentración de Na<sub>2</sub>O equivalente de 0,73%. Para el ensayo se necesita una cantidad de Na<sub>2</sub>O equivalente de 1,25% por lo que se debe añadir la cantidad necesaria de NaOH en el agua de amasado para alcanzar la concentración correcta.

### 6.2.3.1. Preparación de las probetas de hormigón

Se prepara un hormigón de 420 kg/m<sup>3</sup> de cemento. El árido se incluye en una relación árido grueso/árido fino 60:40 en masa. La relación agua/cemento se incrementa con respecto a la que indica la norma para permitir una compactación apropiada del hormigón en los moldes.

Se hacen amasadas de hormigón con la cantidad de material para fabricar dos probetas de 75 mm x 75 mm x 275 mm. Sabiendo la cantidad de hormigón a fabricar se calcula la cantidad de NaOH a añadir en el agua de amasado para alcanzar la concentración de Na<sub>2</sub>O efectiva de 1,25%.

El amasado del hormigón se realiza en una amasadora planetaria de la marca PROETI durante 180 segundos hasta que el hormigón adquiere un aspecto homogéneo y la consistencia adecuada.

En la Figura 6.28 se incluyen la amasadora y los componentes para la realización del hormigón de referencia con árido silíceo.

Se llenan los moldes con el hormigón y se compactan mediante aguja vibradora teniendo especial cuidado en los extremos del molde, donde se encuentran las inserciones metálicas (Figura 6.29).



Figura 6.28. Amasadora planetaria PROETI y componentes para el amasado de hormigón

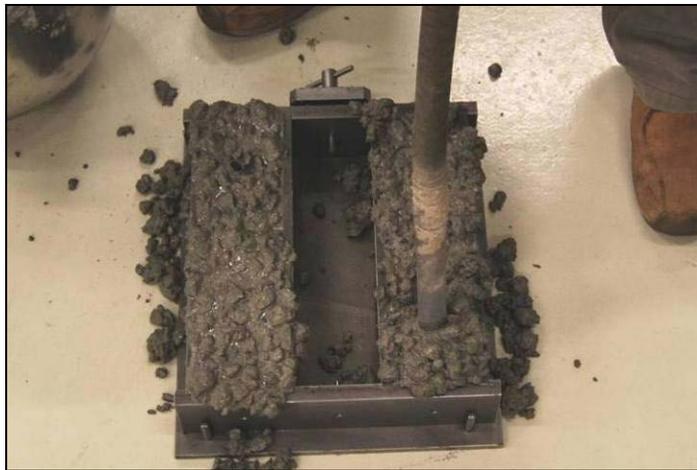


Figura 6.29. Rellenado de los moldes y compactado con aguja vibradora del hormigón

Se retira el exceso de hormigón de las probetas y se introducen, cubiertas por una bolsa de polietileno, en la cámara húmeda durante 24 horas.

### 6.2.3.2. Realización del ensayo y resultados

A las 24 horas de la realización de las probetas estas se desmoldan y, 4 horas más tarde, se miden sus longitudes iniciales. Posteriormente se introducen verticalmente en el contenedor de almacenamiento. En este caso el contenedor es un recipiente de polipropileno en el que se ha colocado una base agujereada, también plástica, debajo de la cual se encuentra un fondo de agua. El contenedor se introduce dentro de un depósito de agua que se mantiene a una temperatura de 38 °C y se recircula en el depósito (Figura 6.30). El contenedor se cierra hermético con su tapa de polipropileno y el depósito se mantiene cerrado con tapa metálica para mantener la temperatura del agua y evitar su evaporación.

De esta forma, las probetas se mantienen a la temperatura y humedad adecuadas. Una vez al mes se sacan, se dejan estabilizar durante 16 horas en condiciones de laboratorio, se inspeccionan visualmente para determinar si se producen fisuras u otros cambios superficiales, y se miden sus longitudes con el equipo que se ilustra en la Figura 3.66 del capítulo 3.



Figura 6.30. Contenedor de almacenamiento de las probetas de hormigón introducido en depósito de agua a 38 °C

Se han preparado 5 amasadas de hormigón, incluyendo una de referencia con el árido silíceo rodado y 4 amasadas en las cuales se cambia la parte del árido fino de la dosificación de hormigón por las cuatro pizarras que se van a ensayar.

De las 7 pizarras solo se van a ensayar la PIZ 1, la PIZ 2, la PIZ 3 y la PIZ 5. Esto es debido a que se tiene la cantidad necesaria de estas pizarras y a que el espacio en los contenedores de ensayo es limitado.

Las mediciones se han llevado a cabo durante 2 años y se ha realizado una medición al mes. En la Figura 6.31 se presenta el gráfico elongación-tiempo de ensayo para las 5 amasadas realizadas.

Como se puede observar en el gráfico, las 4 parejas de probetas de hormigón, fabricadas con pizarra como árido fino, sufren elongaciones mayores de 0,04 mm, que es el valor límite que establece la norma para declarar a los áridos como potencialmente reactivos. El hormigón de referencia no ha sufrido elongaciones por encima de la limitación establecida durante los 2 años de ensayo.

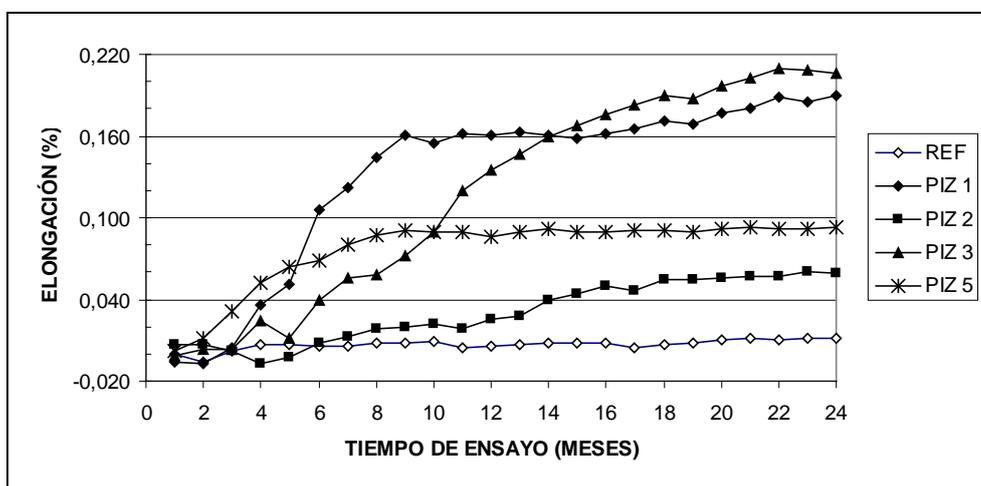


Figura 6.31. Gráfico elongación-tiempo de ensayo. Ensayo de los prismas de hormigón.

Los 4 hormigones realizados con pizarra como árido fino presentan elongaciones mayores al límite de 0,04 mm, establecido por el método observado, por lo que las 4 pizarras ensayadas se clasificarían como áridos reactivos frente a los álcalis de los cementos.

En la Figura 6.31 se observa que el comportamiento de las probetas de las 4 pizarras ha sido bastante diferente. Las probetas realizadas con PIZ 1 alcanzan grandes elongaciones en pocos meses, aunque finalmente son las probetas de PIZ 3 las que presentan mayores porcentajes. El rápido desarrollo de geles en el hormigón de PIZ 1 habrá facilitado la aparición de las grietas que se evidencian en la superficie de las probetas. En el caso contrario se encuentra el hormigón hecho con PIZ 2 cuyas probetas han alcanzado las menores elongaciones y en un tiempo mucho mayor. Este

comportamiento se puede deber a la textura esquistosa de esta pizarra, más difícil de atacar que la estructura filítica de las otras pizarras, como se ha constatado anteriormente en el método químico.

Las probetas con PIZ 1 presentan fisuración con la formación de geles resultado de la reactividad álcali-árido y también la presencia de etringitas secundarias que se desarrollan paralelamente a los geles debido a las condiciones de temperatura y humedad y a la presencia de sulfatos derivados de los minerales de azufre que incorporan las pizarras.

Al mismo tiempo que se realizan las mediciones, las probetas se observan superficialmente en busca de posibles alteraciones. En el mes 12, es decir pasado el primer año, las probetas de hormigón con PIZ 1 como árido fino comenzaron a mostrar un agrietamiento superficial que, a medida que ha pasado el tiempo de ensayo, ha ido aumentando, llegando a formar una red de grietas que progresan de forma aleatoria y que se intercomunican en algunos casos. El resto de probetas no han mostrado ninguna variación superficial excepto la aparición de manchas. En la Figura 6.32 se incluyen imágenes con las alteraciones observadas.



Figura 6.32. Aspecto de las probetas de hormigón ensayadas.  
Detalle de las probetas fisuradas

### 6.2.3.3. Análisis SEM-EDX de las probetas de hormigón

Se ha procedido a la observación de las probetas de hormigón fisuradas mediante microscopía electrónica de barrido y se han realizado análisis mediante espectroscopía de dispersión de rayos x de las zonas en las que se han encontrado estructuras singulares en el hormigón.

En las Figuras 6.33 a 6.36 se incluyen algunas de las estructuras encontradas.

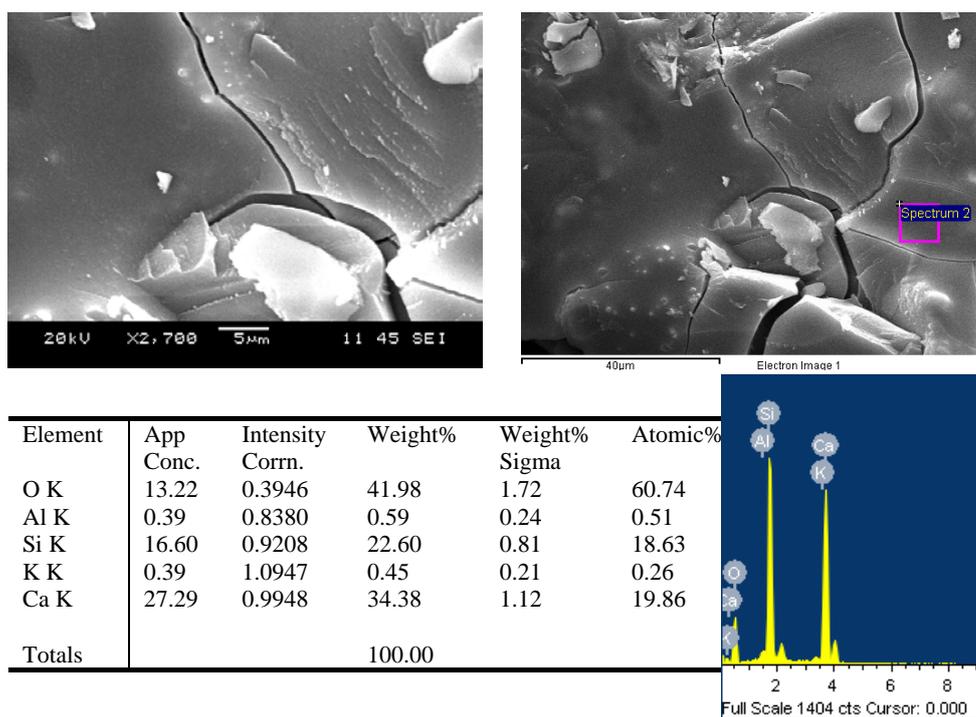


Figura 6.33. Geles lisos en probeta de hormigón con PIZ 1

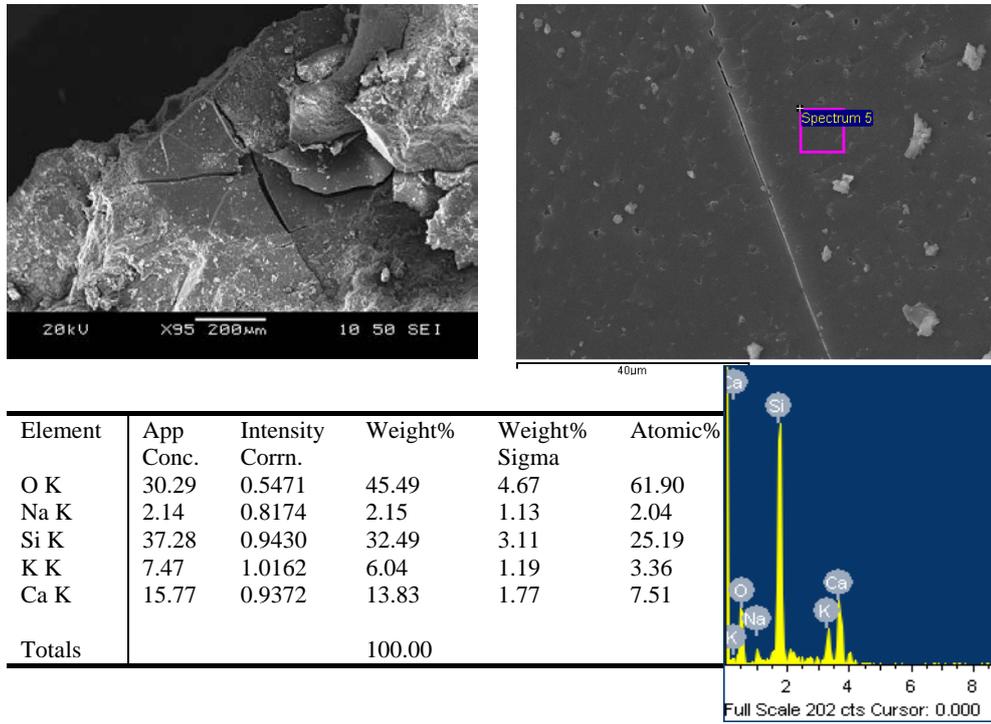


Figura 6.34. Geles lisos en probeta de hormigón con PIZ 1

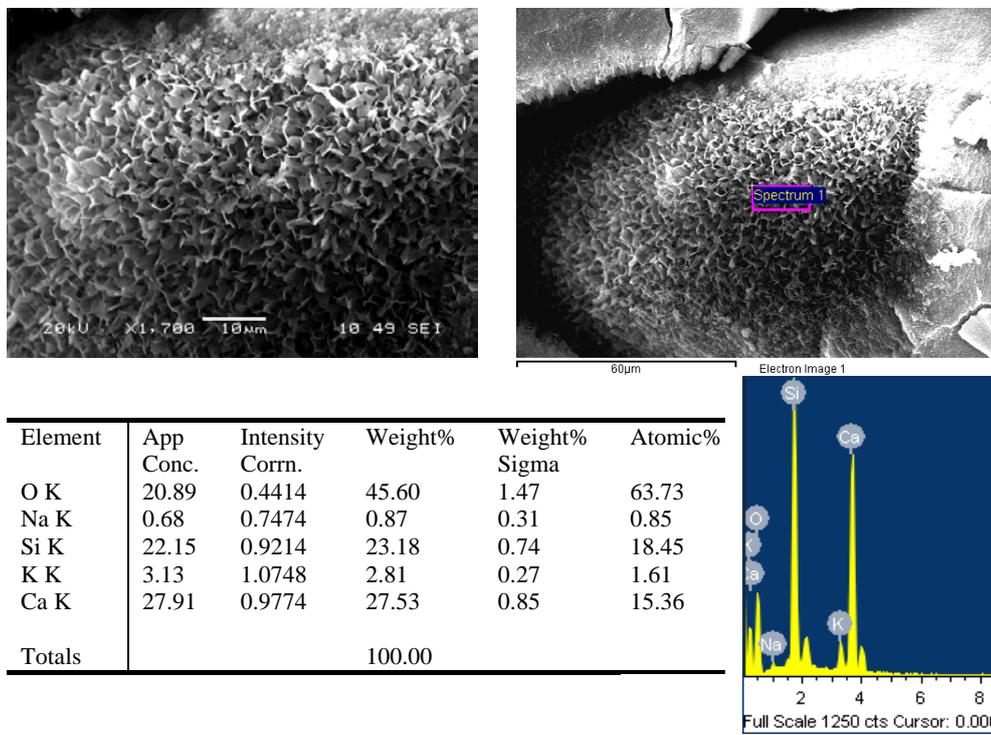
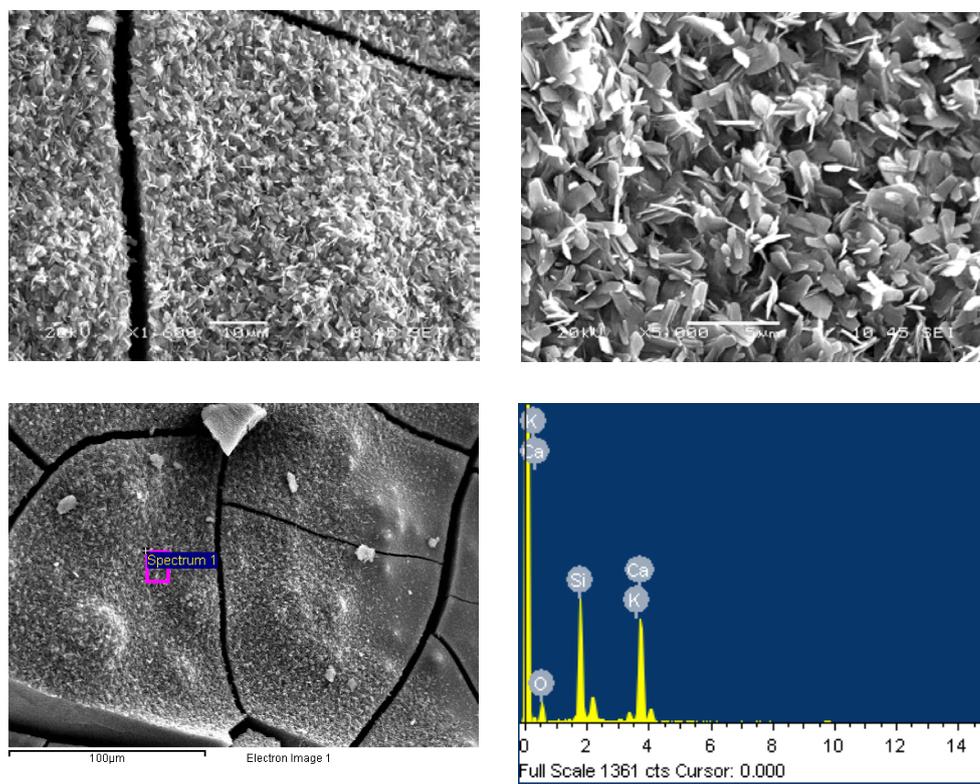


Figura 6.35. Geles en forma de esponja en probeta de hormigón con PIZ 1



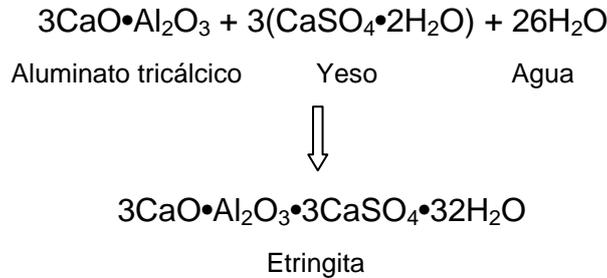
Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	4.81	0.3570	35.87	2.80	54.58
Si K	8.76	0.9405	24.78	1.29	21.47
K K	1.07	1.0968	2.59	0.43	1.61
Ca K	13.65	0.9875	36.77	1.77	22.33
Totals			100.00		

Figura 6.36. Formación en escamas sobre gel liso en probeta de hormigón con PIZ 1.

Se han encontrado geles silicocalcoalcalinos distribuidos ampliamente en las piezas ensayadas. Estos geles presentan diferentes morfologías siendo los más abundantes los geles lisos. Los análisis mediante EDX indican que en la composición de estas estructuras siempre se encuentran grandes cantidades de calcio y silicio y, en menor cuantía, sodio y potasio.

Así mismo se ha encontrado una importante cantidad de formaciones minerales en forma de agujas y con significativos porcentajes de azufre en su composición. Se trata de etringitas secundarias que, en ciertas ocasiones y si el ambiente es favorable, se desarrollan paralelamente a los geles silicocalcoalcalinos reforzando la acción destructiva de éstos, ya que tienen un comportamiento similar en su formación, con grandes aumentos de volumen que dan lugar a presiones disruptivas.

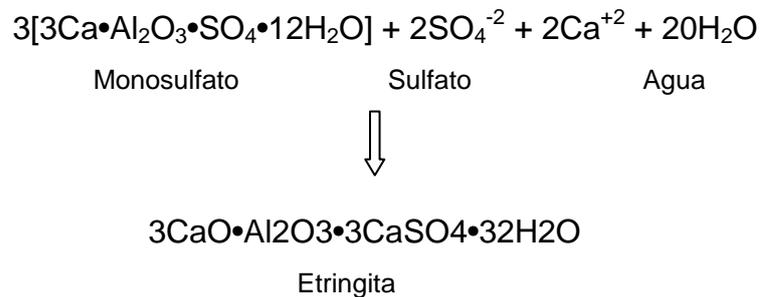
La etringita es un trisulfoaluminato de calcio hidratado que se forma cuando se hidrata el aluminato tricálcico en presencia de yeso. La reacción que ocurre entre estos componentes se puede expresar de forma generalizada:



Una vez que se ha consumido el yeso, la etringita reacciona con el aluminato tricálcico formándose la fase denominada monosulfato, estable en condiciones de pH alto, humedad baja y baja cantidad de sulfatos.

La formación de etringita es uno de los primeros procesos que ocurren en el fraguado de los hormigones y morteros siendo muy importante en el control del tiempo de fraguado de éstos ya que lo aumenta, permitiendo que los materiales se mantengan en estado plástico durante un período adecuado para su utilización y puesta en obra.

El problema surge cuando estas estructuras se forman en hormigones o morteros ya endurecidos. A estas etringitas se las denomina secundarias, para diferenciarlas de las anteriormente citadas que se forman durante el fraguado de los materiales, y se producen cuando cambian las condiciones de los materiales y aumenta la humedad y se dispone de una fuente, externa o interna, de sulfatos. De esta forma el monosulfato puede volver a transformarse en etringita revertiendo la reacción inicial.



Existen múltiples estudios que relacionan los procesos de formación de etringitas secundarias y de reactividad de los áridos en un hormigón ya que la aparición de microgrietas, generadas como resultado de las reacciones álcali-árido-

álcali, facilita la cristalización de etringitas que, por su volumen, dan lugar a presiones en las zonas más estrechas de estas grietas, aumentándolas y favoreciendo la degradación iniciada con la reactividad álcali-árido.<sup>127-129</sup>

Otro aspecto importante que favorece la formación de etringitas cuando se producen fenómenos de reactividad es que la concentración de álcalis en las disoluciones de poro disminuye de forma importante. La presencia de estos álcalis dificulta la formación de etringita ya que se forman los aluminatos de estos, manteniéndose los sulfatos disueltos en las disoluciones de poro.<sup>130</sup>

La presencia de piritas en la pizarra utilizada como árido puede aumentar la concentración de sulfatos en el hormigón ya que, en ambientes de alta humedad y temperatura, se favorece la oxidación de los sulfuros de hierro y se tiene así una fuente adicional de sulfatos necesarios para la formación de las etringitas.<sup>131</sup>

En cuanto a las estructuras que se forman se distinguen dos tipos<sup>132</sup>, dependiendo de la concentración de portlandita disponible a la hora de formarse la etringita. Cuando el contenido en portlandita es elevado la solubilidad de la etringita es muy baja, con lo que se producen muchos núcleos de cristalización que van a dar lugar a una formación en masa de cristales pequeños y de naturaleza más o menos coloidal. Estos cristales generan tensiones elevadas debido a las presiones de cristalización que acompañan a su formación. Es la etringita denominada tipo II. Formaciones de este tipo son las que se muestran en la Figura 6.37.

---

<sup>127</sup> Diamond, S. Delayed ettringite formation - Processes and problems. *Cement and Concrete Composites*. 18 (1996): 205-215.

<sup>128</sup> Shayan, A., Ivanusec, I. An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Composites*. 18 (1996) 161-170.

<sup>129</sup> Ekelu, S.O., Thomas, M.D.A., Hooton, R.D. Implications of pre-formed microcracking in relation to the theories of DEF mechanism. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 161-165.

<sup>130</sup> Brown, P.W., Bothe, J.V. The stability of ettringite, *Advanced Cement Research*. 5 (18) (1993) 47-63.

<sup>131</sup> Lee, H., Cody, R.D., Cody, A.M., Spry, P.G. The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 332-343.

<sup>132</sup> Adamopoulou, E., Pipilikaki, P., Katsiotis, M.S., Chaniotakis, M., Katsioti, M. How sulfates and increased temperature affect delayed ettringite formation (DEF) in white cement mortars. *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 3583-3590.

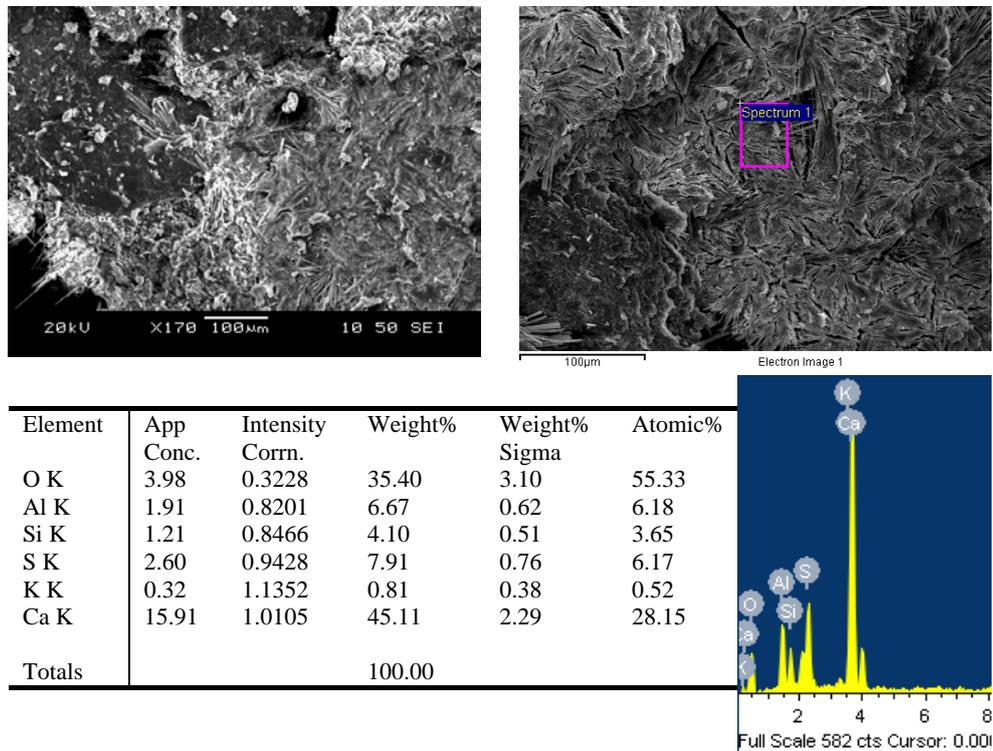


Figura 6.37. Formaciones de etringita tipo II en probeta de hormigón con PIZ 1

En la Figura 6.38 se observan cristales de forma acicular, bien formados y de densidad mayor a los anteriores. Estas estructuras se deben a una menor concentración de portlandita en su formación, lo que redundaría en disoluciones con grado de saturación menor en etringita que da lugar a una cristalización más lenta en la que los cristales formados se acomodan a los espacios intersticiales existentes en el hormigón y no dan lugar a fenómenos de expansión. Es denominada etringita tipo I.

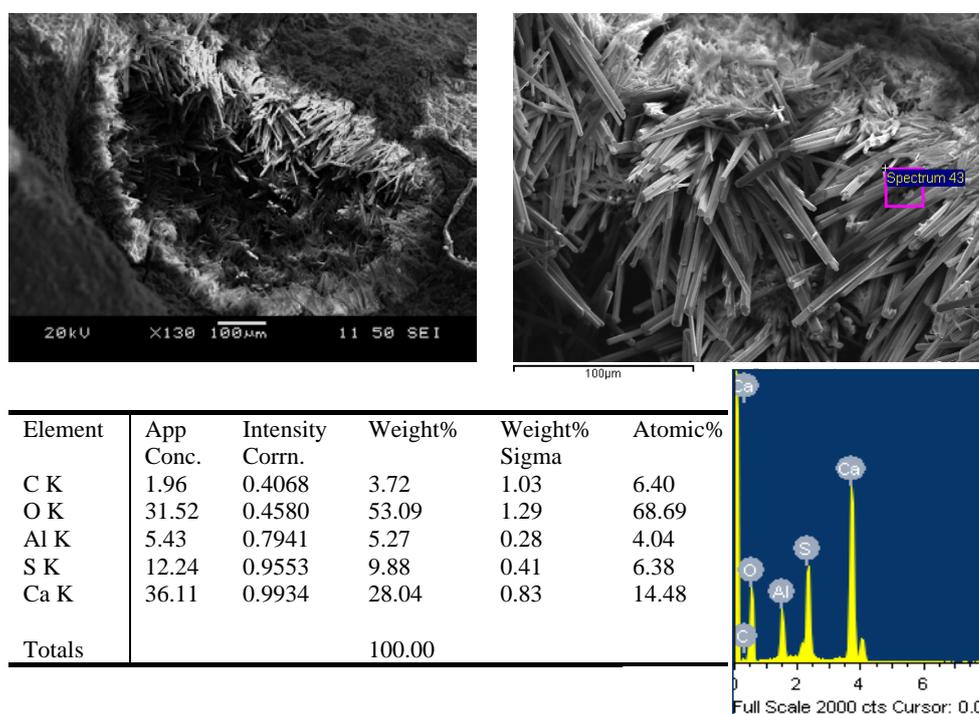


Figura 6.38. Formaciones de etringita tipo I en probeta de hormigón con PIZ 1

#### 6.2.3.4. Análisis mediante tomografía axial computarizada (TAC)

Se ha procedido a realizar una tomografía axial a una de las probetas fabricadas con PIZ 1 que presentaron fisuras estructurales, para conocer el alcance y distribución de estas fisuras en el interior de la probeta.

El ensayo se ha realizado en una porción de unos 50 milímetros de los 275 que tiene la probeta de longitud. Se ha escogido una zona con una alta densidad en grietas y que incluye algunas de las de mayor magnitud.

Para realizar la prueba la probeta se ha colocado verticalmente en la bancada del equipo y se ha procedido a escanear la pieza para obtener una imagen perpendicular al eje cada 0,3 mm. Se obtienen así 168 imágenes de un volumen de la pieza de 75 mm x 75 mm x 50 mm.

Las imágenes obtenidas se procesan mediante el programa informático Mimics 10.0.

Como se ve en la Figura 6.39 la mayoría de las grietas no alcanzan una gran profundidad en la pieza quedándose, en su mayoría, por debajo del centímetro de profundidad desde la superficie exterior de la probeta. Solo las grietas de mayor tamaño alcanzan profundidades mayores, como la medida en la fotografía que alcanza casi los 2 cm de profundidad con respecto al lado derecho de la probeta.

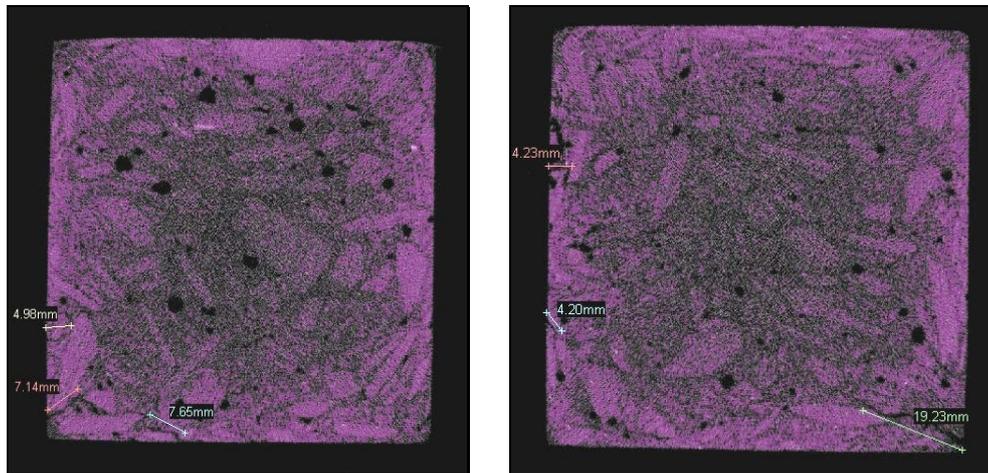


Figura 6.39. Cortes axiales realizados mediante TAC en la probeta prismática de hormigón.

La Figura 6.40 es una imagen de las diferentes vistas que proporciona el programa informático de las tomografías analizadas. Las dos imágenes de la izquierda son dos cortes paralelos al eje de la probeta y prácticamente en la superficie de esta. En dichos cortes se aprecian las grietas de forma similar a la visión directa de la probeta ya que son cortes a escasa distancia de la superficie, excepto que no se tiene el impedimento de la pasta de cemento exterior de la probeta por lo que también se pueden ver perfectamente los poros existentes en el material y la distribución de los áridos.

Por último, en la imagen inferior derecha se puede ver una reconstrucción tridimensional del volumen de probeta analizado pudiéndose apreciar también las grietas que presenta.

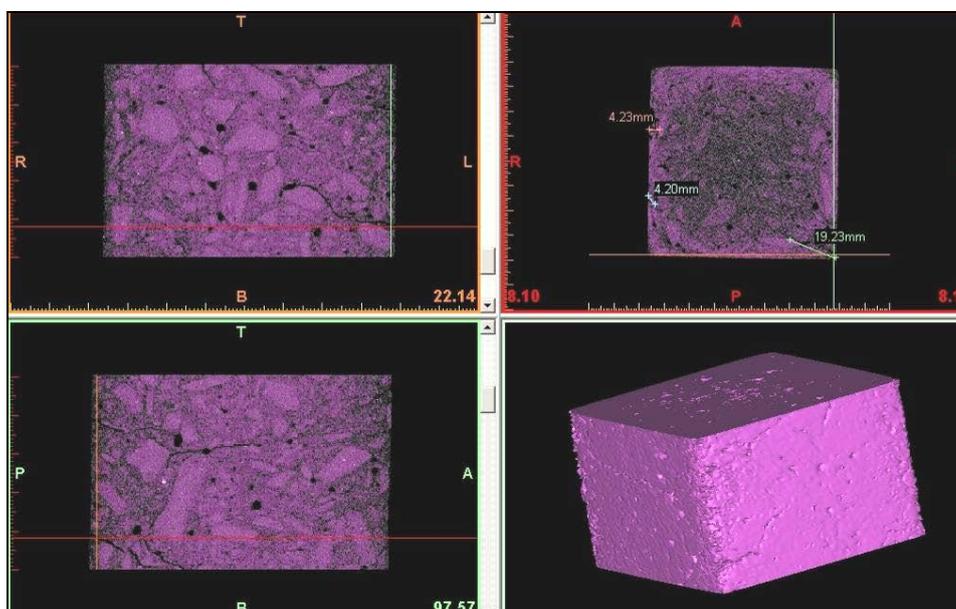


Figura 6.40. Imágenes de distintas secciones de la probeta ensayada y reconstrucción en 3D

#### 6.2.3.5. Conclusiones acerca de la reactividad de las pizarras

Los ensayos llevados a cabo a las pizarras permiten concluir, con un amplio grado de convencimiento, que este tipo de rocas sufren reacciones álcali-sílice y álcali-silicato cuando se usan como áridos en hormigones y morteros de cemento.

El examen petrográfico de las pizarras muestra que son rocas con gran cantidad de compuestos de silicio, como cuarzo, micas o clorita, susceptibles de aportar sílice en las disoluciones alcalinas de los poros de hormigones y morteros, como se ha corroborado en el ensayo químico de reactividad, en el que se han medido grandes cantidades de sílice en las disoluciones de hidróxido sódico. En ese medio se generan los geles higroscópicos, que producen grandes presiones en el interior de los materiales, llegando a generar el agrietamiento de éstos cuando no pueden expandirse para acomodar a los geles generados. Estos agrietamientos se observan en las probetas de mortero del ensayo acelerado en probetas de mortero y también en algunas de las probetas prismáticas de hormigón y se ha constatado la presencia de los geles por medio de microscopía electrónica. Todas las probetas en ambos ensayos sufren importantes aumentos de tamaño.

Los hormigones y morteros afectados por este tipo de reactividad llegan a perder resistencias mecánicas y se ven afectados más fácilmente por los diferentes contaminantes ambientales a los que se ven expuestos, lo que aumenta todavía más su degradación. Esto hace que la utilización de este

tipo de áridos, sin las debidas precauciones, no sea adecuada en la fabricación de hormigón o mortero de cemento.

#### 6.2.4. Tentativas para la eliminación o disminución de la reactividad álcali-árido en las pizarras

Existen varios métodos con los que se intenta eliminar o, por lo menos, minimizar los efectos provocados por la presencia de un árido reactivo en un hormigón o mortero de cemento. A continuación se incluyen algunos de los que mejores resultados han reportado y que se han probado con las pizarras.

##### 6.2.4.1. Uso de cementos con bajo contenido en álcalis

El uso de cementos con bajo contenido en álcalis disminuye la concentración de éstos en las disoluciones de poro con lo que se elimina un componente necesario para que se dé la reactividad.<sup>37</sup> Estos cementos se consiguen mediante una cuidada selección de las materias primas que los componen y unos procesos de fabricación específicos que permiten que los niveles de NaOH equivalente no sobrepasen el 0,60%, que es el porcentaje en peso por debajo del cual se considera a un cemento de bajo contenido en álcalis.

Existen varios problemas a la hora de utilizar estos cementos para eliminar la reactividad. En primer lugar, limitando el contenido de álcalis del cemento utilizado no se puede asegurar que no lleguen estos elementos a las disoluciones de poro de los hormigones o morteros ya que puede haber fuentes internas, los propios áridos o incluso aditivos, o fuentes externas, como fundentes para prevenir las formaciones de hielo, que incrementarían las concentraciones de los álcalis y podrían propiciar la reactividad en los materiales en servicio fabricados con áridos reactivos.

Otra desventaja de este procedimiento es que es muy complicado comprobar empíricamente si la disminución de los álcalis conlleva una mejora en el comportamiento del hormigón o mortero, ya que casi todos los métodos desarrollados para el estudio de reactividad de los áridos requieren un alto contenido en álcalis para acelerar los procesos en los materiales, de manera que se pueda estimar el comportamiento del árido estudiado en un espacio de tiempo adecuado que haga que el ensayo sea útil.

El único ensayo en el que se puede estudiar de una forma fiable cómo varía el comportamiento de un árido con el contenido de álcalis aportado por el cemento es el de exposición de grandes bloques de hormigón a la intemperie, que no resulta operativo ya que requiere un tiempo de ensayo excesivamente largo, de años.<sup>59</sup>

Como comprobación se han ensayado dos filitas, la PIZ 1 y la PIZ 5, y dos esquistos, la PIZ 2 y la PIZ 4, de las siete pizarras disponibles, mediante el

método acelerado en probetas de mortero pero utilizando un cemento de bajo contenido en álcalis. Concretamente se utilizó un CEM I 52,5 R especialmente diseñado por Portland Valderrivas para la fabricación de traviesas de hormigón para las vías de ferrocarril. Las características de este cemento se incluyen en la Figura 6.41.

FLUORESCENCIA RX (%)			
<b>SiO<sub>2</sub></b>	23,90	<b>MgO</b>	3,00
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5,20	<b>MnO</b>	0,04
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,90	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,16
<b>CaO</b>	57,90	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,50
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,16	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,10
<b>Perdida fuego</b>	2,20	<b>SO<sub>3</sub></b>	2,99

<b>Na<sub>2</sub>O equivalente (%)</b>	0,49
<b>Residuo insoluble (%)</b>	0,33
<b>Expansión (mm)</b>	0,6
<b>Cloruros (%)</b>	0,01

Figura 6.41. Características del CEM I 52,5 R de bajo contenido en álcalis

Las elongaciones medidas a las probetas se incluyen en el gráfico de la Figura 6.42, en el que se puede ver que todas las probetas han superado ampliamente la limitación de 0,1% de elongación a 14 días. Si se comparan éstas gráficas con las de la Figura 6.12 se observa que las tendencias de las líneas de morteros hechos con las mismas pizarras son similares en ambos ensayos, con lo que se puede concluir que la utilización de un cemento de bajo contenido en álcalis se ve totalmente contrarrestada con la inclusión de las probetas en la disolución de NaOH, que aporta a los morteros los álcalis necesarios para que se den las reacciones.

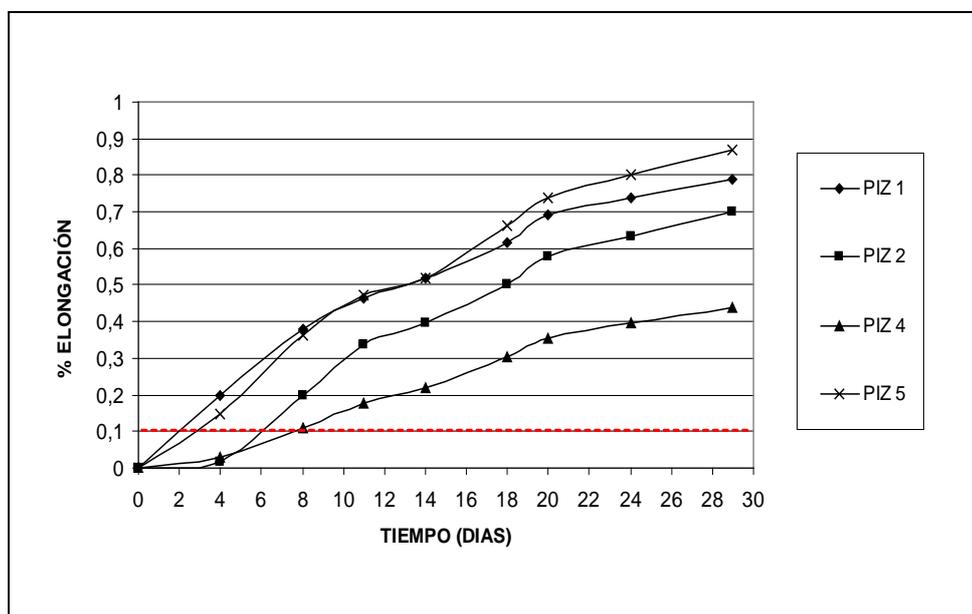


Figura 6.42. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas realizadas con cemento de bajo contenido en álcalis

#### 6.2.4.2. Uso de aditivos de litio

Como se ha explicado en la Introducción general, los aditivos de litio han dado buenos resultados, en general, para la reducción de la reactividad de áridos reactivos, aunque todavía, a día de hoy, no se conocen en profundidad los procesos que dan lugar a los beneficios aportados por estos compuestos.

Existen varias teorías, pero todas centran sus explicaciones en dos procesos que se dan en estas reacciones. Por un lado unas teorías defienden que los aditivos de litio disminuyen, por diferentes mecanismos, la concentración de sílice disuelta disponible en las disoluciones de poro, mientras que otros investigadores defienden que las mejoras vienen de la formación de productos de reacción no expansivos o menos expansivos que los geles silicocalcoalcalinos resultado de la reactividad estudiada.<sup>77</sup>

Se han probado muchos aditivos de litio llegando a la conclusión de que el más prometedor de todos es el  $\text{LiNO}_3$ , ya que es muy soluble, no aumenta el pH en las disoluciones de poro y el anión nitrato que introduce es bastante inocuo para el medio en el que se va a alojar.<sup>80</sup>

En el caso de las pizarras estudiadas en el presente trabajo se han probado varios aditivos de litio, en distintas situaciones de ensayo y diferentes ensayos. Los resultados no han sido positivos y los aditivos de litio no resultan una buena solución para disminuir la reactividad de los mortero u hormigones que incluyen pizarras como áridos. A continuación se exponen los trabajos realizados a este respecto.

### 6.2.4.2.1. Ensayo acelerado en probetas de mortero con aditivos de litio

Se han ensayado morteros con 4 de las 7 pizarras mediante el método acelerado en probetas de mortero, a los que se les han añadido distintos aditivos de litio en distintas concentraciones.

Las pizarras que se han utilizado son, como en el apartado 6.2.3.1, dos filitas, la PIZ 1 y la PIZ 5, y dos esquistos, la PIZ 2 y la PIZ 4. Con estos cuatro áridos se han realizado amasadas de mortero, incluyendo en el agua de amasado la cantidad de aditivo de litio necesaria para que la concentración molar de litio fuese la misma que la suma de las concentraciones de sodio y de potasio, es decir,  $[Li]/[Na+K] = 1$ . Se ha elegido esta proporción para asegurar que la concentración de litio supera ampliamente los umbrales mínimos necesarios para que el derivado de litio sea efectivo en la disminución de la reactividad.<sup>69</sup>

Los aditivos de litio probados son  $LiNO_3$  y  $LiOH$  de calidad PA.

Examinando las Figuras 6.43 y 6.44 se observa que en todos los casos las elongaciones de las muestras medidas a 14 días de ensayo han superado el 0,1%, que es el límite de aumento de longitud que permite la norma para clasificar a los áridos integrantes de esos morteros como no reactivos. Así pues, con estos aditivos no se consigue disminuir la reactividad de los áridos hasta el punto de poder ser considerados aptos para su uso.

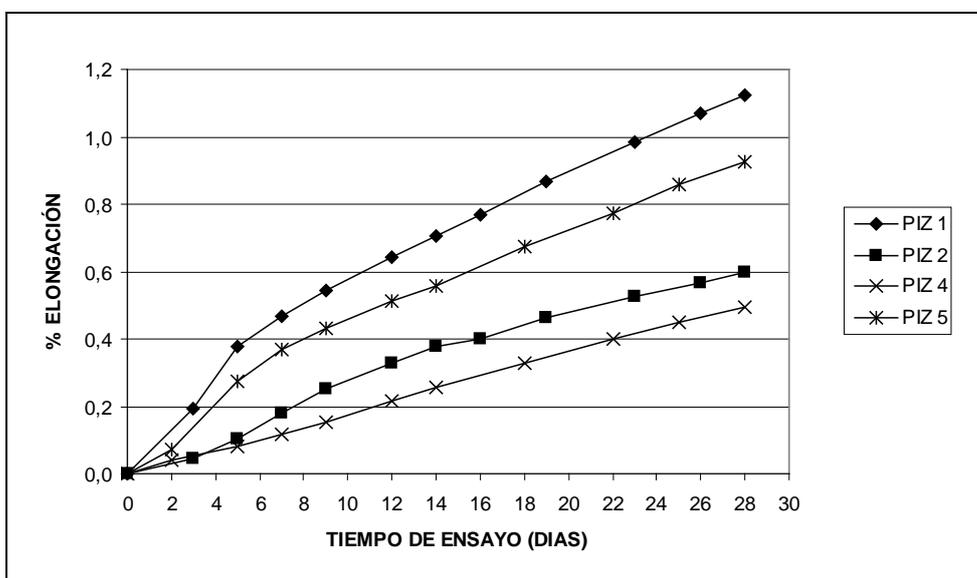


Figura 6.43. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas de mortero fabricadas con aditivo  $LiNO_3$  con concentración molar  $[Li]/[Na+k]=1$

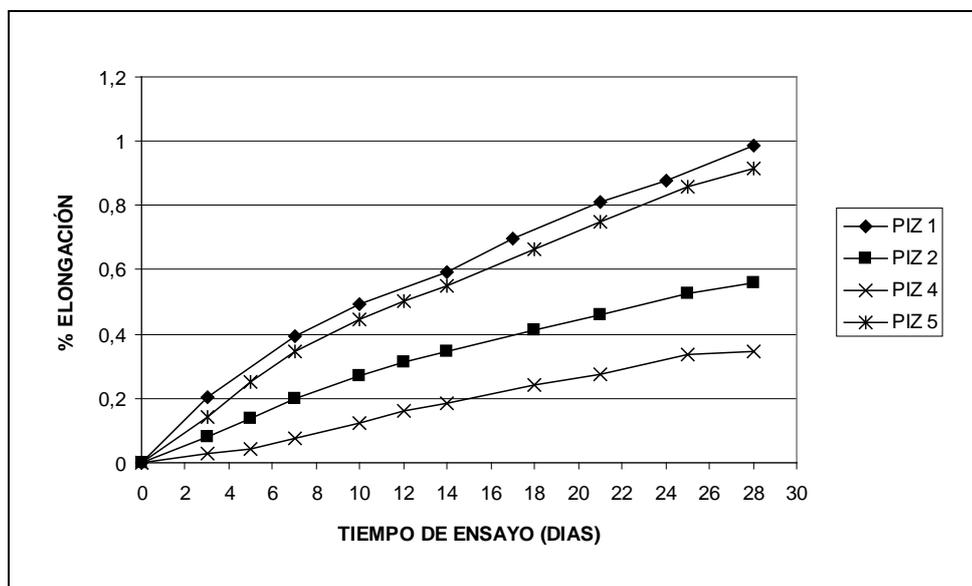


Figura 6.44. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas de mortero fabricadas con aditivo LiOH con concentración molar  $[Li]/[Na+k]=1$

Es más, si se comparan las curvas obtenidas en las Figuras anteriormente referidas con las de los morteros hechos con las mismas pizarras en la Figura 6.12, se puede decir que los comportamientos de los morteros no han variado apreciablemente, a excepción del mortero de PIZ 2 en el que se puede observar cierta disminución en sus elongaciones. Incluso se aprecia un peor comportamiento de los morteros que incluyen  $LiNO_3$  ya que presentan elongaciones sensiblemente mayores que los morteros que no llevan aditivos de litio (excepto el mortero con PIZ 2). Esta es una conducta de difícil explicación de la que no se han encontrado precedentes bibliográficos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se ha realizado una comprobación para verificar si la concentración molar de litio aplicada es suficiente o si el problema radica en un aporte demasiado reducido del elemento. Para ello se han fabricado series de mortero con PIZ 1 como árido y  $LiNO_3$  como aditivo en relaciones molares,  $[Li]/[Na+k]$ , que van desde 0 hasta 2.

Los resultados de la prueba se ilustran en la Figura 6.45, donde se observa que la variación de comportamiento de los morteros con distintas concentraciones de litio es muy pequeña y que la tendencia, en cualquier caso, es hacia el aumento de la reactividad de la pizarra, con un incremento en el contenido de litio.

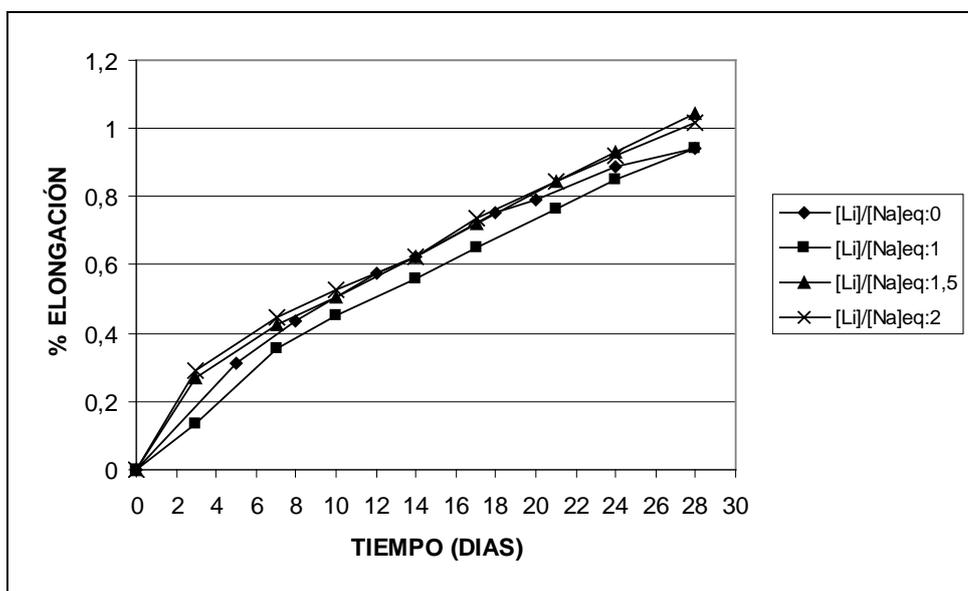


Figura 6.45. Alargamientos de morteros realizados con PIZ 1 y diferentes concentraciones de nitrato de litio para tener relaciones molares  $[Li]/[Na+k]$  de 0 a 2

Por último, se ha llevado a cabo otra comprobación para verificar si el procedimiento de ensayo puede ser inadecuado y llevar a conclusiones erróneas. El método acelerado en probetas de mortero se basa en acelerar la posible aparición de reactividad manteniendo las probetas en una disolución de NaOH 1N a alta temperatura. En estas condiciones se podría pensar que se puede producir una migración del litio de las disoluciones de poro, en las que está bastante concentrado, a la disolución de NaOH en la que se encuentran las probetas y que no contiene litio. Este hecho conllevaría una disminución importante en la concentración de litio en el interior de los morteros, de tal manera que no se llegaría a la cantidad mínima necesaria para que el aditivo de litio fuera efectivo.

Para comprobar la relevancia de una posible migración del litio se fabrican series de probetas con PIZ 1, de nuevo como árido, y  $LiNO_3$  disuelto en el agua de amasado en la cantidad necesaria para alcanzar una relación molar  $[Li]/[Na]_{eq}=1$  con relación a los álcalis aportados por el cemento. Estas series de probetas se van a introducir en disoluciones de NaOH 1N a las que se les añade la cantidad necesaria de  $LiNO_3$  para alcanzar relaciones molares  $[Li]/[Na]$  de entre 0 y 1,5. De esta forma se tiene litio dentro y fuera de las probetas, lo que eliminaría el efecto de migración de éste. Las probetas se mantienen en las disoluciones a 80 °C y se miden sus longitudes en diferentes momentos del ensayo, como es preceptivo en el método acelerado en probetas de mortero.

Los resultados de este ensayo se presentan en la Figura 6.46. Sorprendentemente, la inclusión de litio en la disolución de ataque no solo no mejora los resultados en cuanto a la disminución de las elongaciones de las probetas, sino que se produce el efecto contrario y las elongaciones son mayores cuanto mayor es la relación molar  $[Li]/[Na]$  de la disolución en la que se encuentran inmersas las probetas.

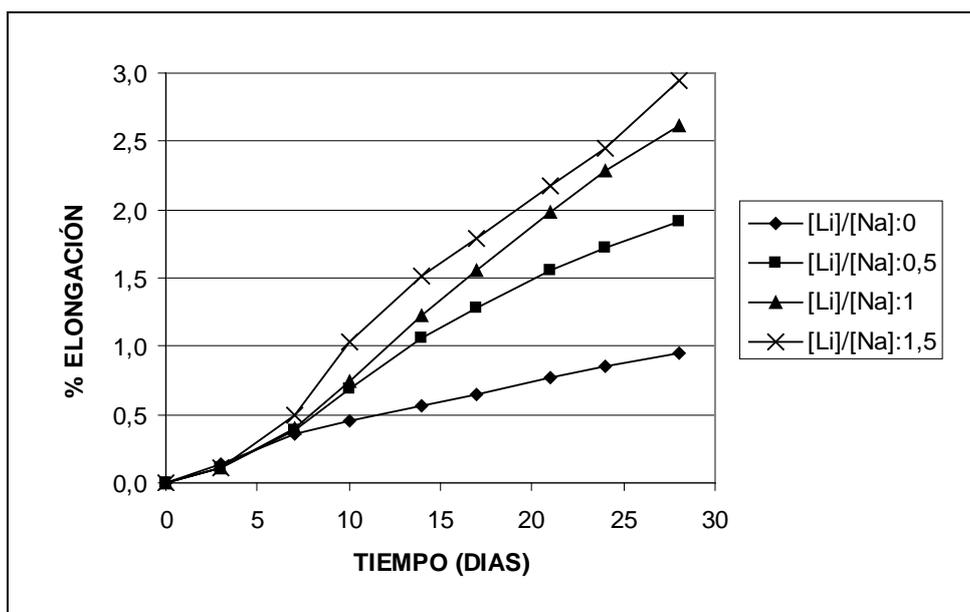


Figura 6.46. Alargamientos de morteros realizados con PIZ 1 y  $LiNO_3$  con relación molar  $[Li]/[Na]_{eq}=1$ , inmersos en disoluciones de  $NaOH$  1 N y  $LiNO_3$  en con relaciones molares de 0 a 1,5

Las diferencias en las longitudes alcanzadas por las probetas así como la degradación sufrida por estas se hacen evidentes con una simple comparación visual. En la Figura 6.47 se pueden comparar piezas de distintas series y se observa perfectamente que las longitudes aumentan a medida que aumenta la cantidad de litio en disolución y, además, se puede comprobar la aparición de la fisuración superficial en las dos probetas más largas. Esta fisuración es característica de los materiales que han sufrido procesos de reactividad.



Figura 6.47. Probetas de mortero tratadas con distintas concentraciones de  $LiNO_3$ . Se observan diferencias en longitudes y agrietamiento superficial.

#### 6.2.4.2.2. Ensayo de los prismas de hormigón con aditivos de litio

Se han realizado parejas de probetas de hormigón para el ensayo de reactividad mediante prismas de hormigón en los cuales se ha incluido, disuelta en el agua de amasado, la cantidad necesaria de  $LiNO_3$  para alcanzar una relación molar  $[Li]/[Na+k] = 1$ . Estos prismas se han mantenido durante 2 años a una temperatura de  $38\text{ }^{\circ}C$  y en un ambiente de alta humedad como se ha explicado en el punto 6.2.3 de este trabajo. Se han tomado medidas de longitud una vez al mes.

Las arenas utilizadas en estos hormigones provienen de las muestras PIZ 2, PIZ 3 y PIZ 5, mientras que los áridos de mayor grosor son los mismos silíceos rodados, utilizados anteriormente para este ensayo.

Los resultados de elongación frente a tiempo de ensayo se incluyen en la Figura 6.48. En el gráfico se observan comportamientos dispares. Si se comparan las curvas obtenidas con las de la Figura 6.31 se ve que los hormigones con PIZ 2 y PIZ 5 con aditivo de litio sufren menores elongaciones que los hormigones que no tienen el aditivo, es decir, su comportamiento mejora ligeramente en cuanto a la disminución de la reactividad. La mejora es muy pequeña y en el caso de la PIZ 5 no resulta suficiente para estar dentro del límite del 0,04% de elongación que se ha fijado por norma.

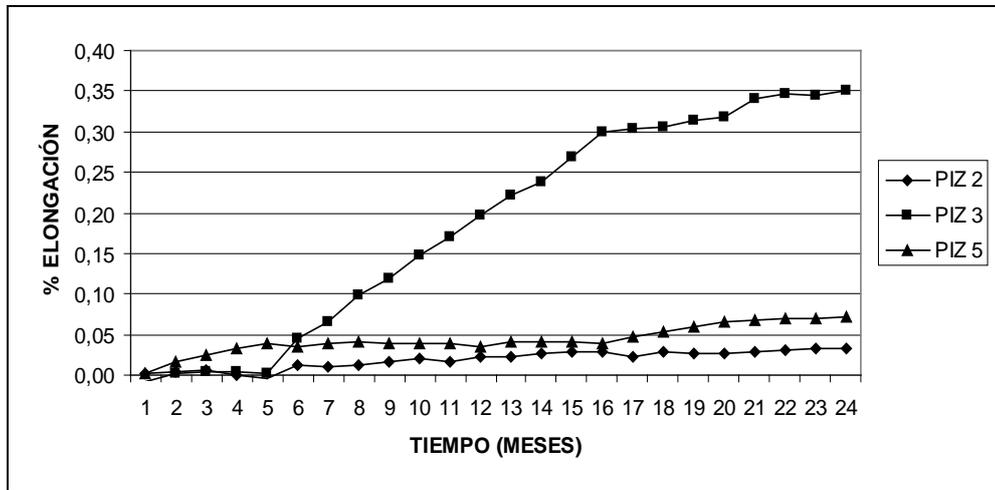


Figura 6.48. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas de hormigón fabricadas con aditivo  $\text{LiNO}_3$  con concentración molar  $[\text{Li}]/[\text{Na}+\text{k}]=1$

Por el contrario, en el caso de la PIZ 3 el comportamiento es el contrario y el hormigón con litio sufre elongaciones sensiblemente mayores cuando incluye el derivado de litio que cuando no lo incluye.

Estas elongaciones han conducido a la aparición de importantes fisuras en las probetas (Figura 6.49) y el análisis al microscopio electrónico de barrido de zonas adyacentes a estas fisuras ha revelado importantes formaciones de geles silicocalcalinos acompañadas de apreciables cantidades de etringita secundaria.



Figura 6.49. Probetas de hormigón fabricadas con PIZ 3 y aditivo  $\text{LiNO}_3$  con concentración molar  $[\text{Li}]/[\text{Na}+\text{k}]=1$ . Se observa un importante grado de fisuración superficial

Algunas de las formaciones vistas se incluyen en la Figura 6.50 y 6.51, acompañadas por sus análisis de dispersión de rayos X.

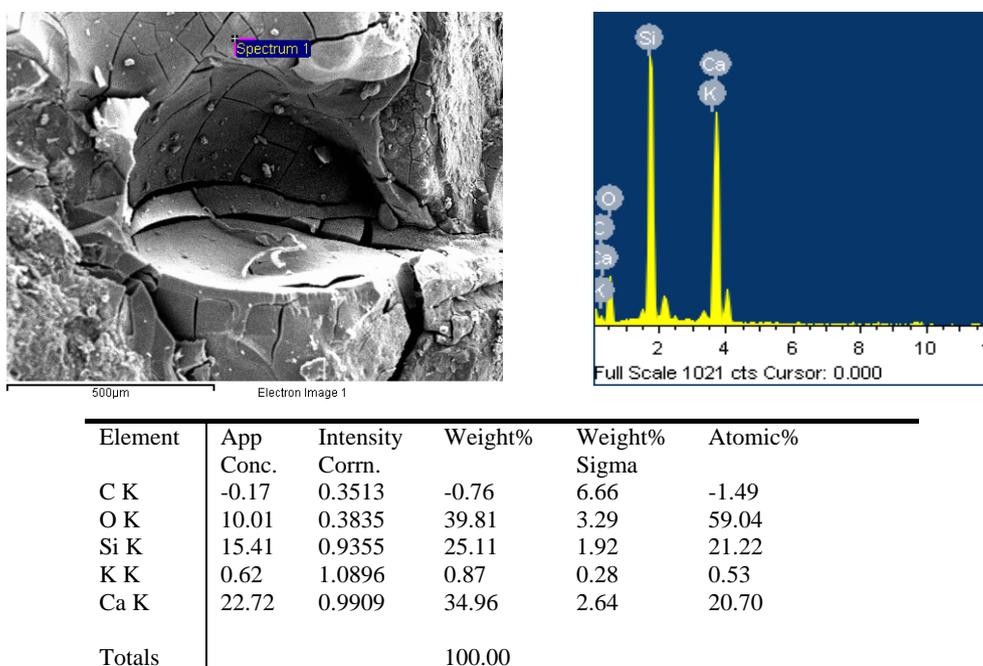


Figura 6.50. Geles lisos en probeta de hormigón con PIZ 3 y aditivo LiNO<sub>3</sub>

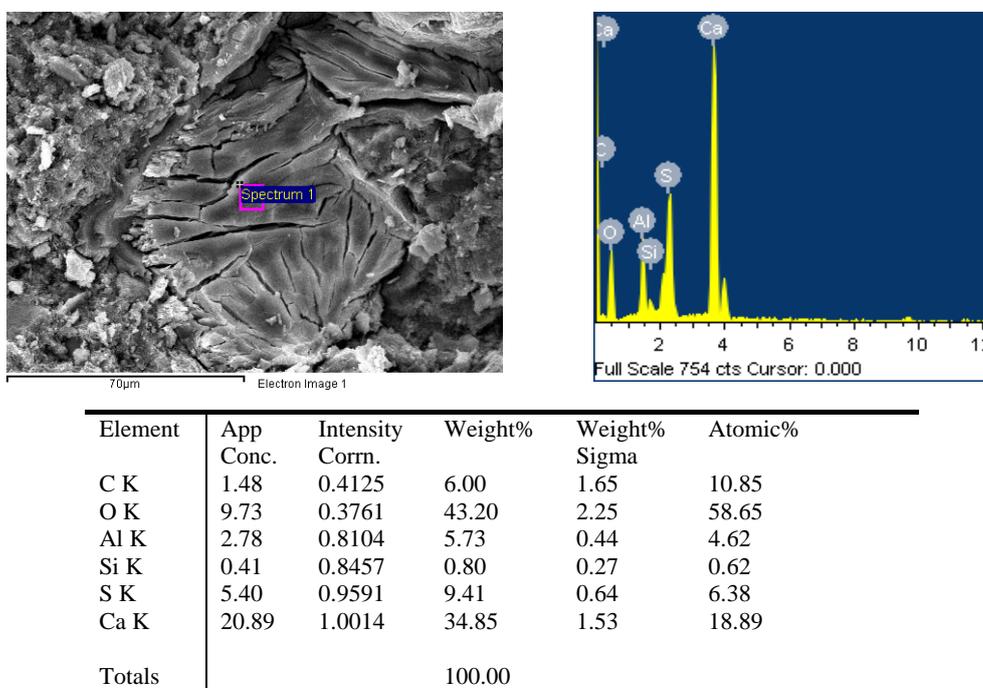


Figura 6.51. Formaciones de etringita tipo II en hormigón con PIZ 3 y aditivo LiNO<sub>3</sub>

Para conocer mejor el desarrollo de las fisuras aparecidas en estas probetas se ha procedido a realizar una tomografía axial computarizada, TAC, a la probeta más dañada en la zona en la que las fisuras son más pronunciadas. Esta zona corresponde con la imagen superior derecha de la Figura 6.49.

En la imagen de la Figura 6.52 se ven grietas que comienzan en la superficie de la probeta y se adentran, alcanzando profundidades importantes en la probeta. Así mismo también se observan grietas internas, e incluso se pueden reconocer áridos rodeados por un espacio en negro, lo que sugiere que se han separado de la pasta circundante, muy probablemente por la generación de geles que se interponen entre ellos. Un ejemplo de este tipo se marca en la fotografía mediante un círculo rojo.

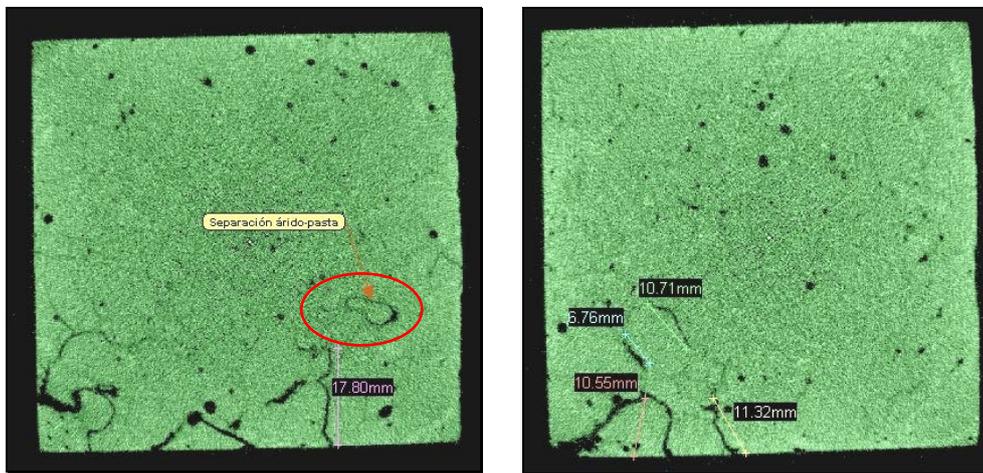


Figura 6.52. Cortes axiales realizados mediante TAC en la probeta de hormigón

En la imagen 6.53 se incluyen, a la izquierda, dos cortes paralelos al eje de la probeta y prácticamente en la superficie de ésta en los que se aprecia, de una forma limpia y clara, la distribución de grietas y poros en las superficies de la misma.

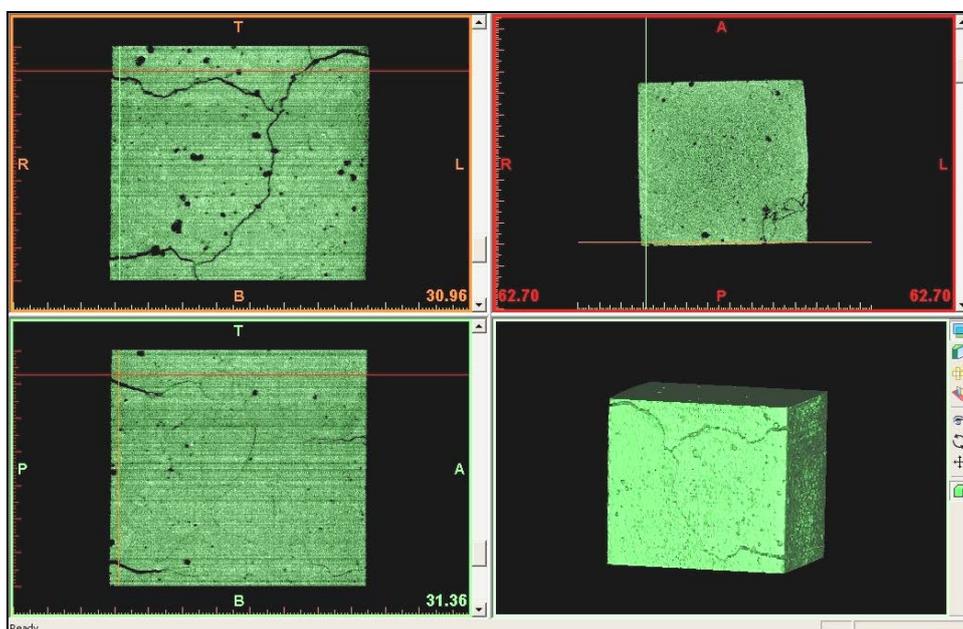


Figura 6.53. Imágenes de distintas secciones de la probeta ensayada y reconstrucción en 3D

En la imagen superior derecha se observa otro corte axial con importantes grietas en su zona inferior derecha y, por último, debajo, se puede ver una reconstrucción tridimensional del volumen de probeta analizado, pudiéndose apreciar también las grietas que presenta.

Si se comparan estas imágenes con las de las Figuras 6.39 y 6.40 se observa claramente que esta probeta se encuentra mucho más dañada superficial e interiormente que la de las figuras referidas.

También se ha probado el aditivo LiOH en prismas de hormigón. Concretamente se ha realizado una serie de dos probetas con PIZ 3 como árido y el aditivo de litio suficiente para alcanzar relación molar  $[Li]/[Na+k] = 1$ . En la Figura 6.54 se incluye la curva elongación frente a tiempo de reacción para estas probetas, así como la curva obtenida con el aditivo  $LiNO_3$  (Figura 6.48) para su comparación.

Como se puede observar en el gráfico, las probetas con LiOH han sufrido mayores elongaciones que las que contenían  $LiNO_3$ , lo cual está dentro de los comportamientos estudiados en otras investigaciones, y se explica puesto que el LiOH tiene el efecto negativo de introducir iones hidróxido,  $OH^-$ , al hormigón, lo que favorece la reactividad de los áridos. En este caso se podría pensar que no se ha alcanzado la concentración mínima efectiva del LiOH, que sería aquella a partir de la cual los efectos positivos de la introducción del

lito en el hormigón prevalecen sobre los efectos negativos de la inclusión del anión hidróxido.

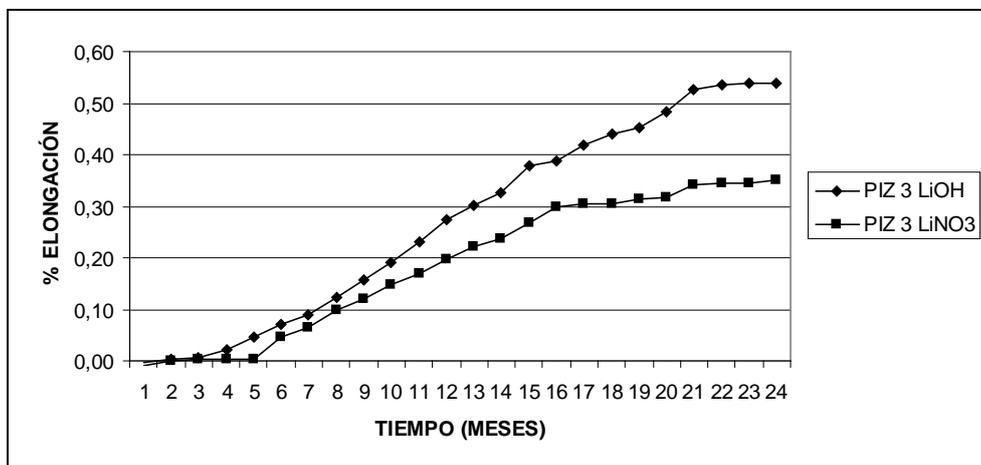


Figura 6.54. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas de hormigón fabricadas con PIZ 3 y aditivos de litio con concentración molar  $[Li]/[Na+k]=1$

En la bibliografía consultada las concentraciones efectivas de LiOH suelen ser bastante menores a las probadas en este estudio, aunque hay que indicar que cada tipo de árido presenta una concentración mínima efectiva propia en función de su naturaleza mineral.

#### 6.2.4.3. Uso de cementos con adiciones minerales

La sustitución de un porcentaje de clinker por una o varias adiciones minerales, en hormigones o morteros, para la minimización o eliminación de la reactividad álcali-árido, es un tema que se viene estudiando con especial interés desde finales de los años 80 hasta la actualidad. Las adiciones que más se han probado son el humo de sílice, las cenizas volantes, las escorias de horno alto y mezclas de diferentes porcentajes de estas. Los resultados obtenidos con estas adiciones han sido más o menos afortunados.

A pesar de todos los trabajos realizados hasta la fecha, el mecanismo de actuación de estas adiciones, en los casos en los que se consigue disminuir la reactividad de los áridos, no se conoce en profundidad.

La teoría que apoya un mayor número de investigadores es que el principal efecto de las adiciones es la eliminación, parcial o total, de la portlandita disponible para reaccionar formando geles. En ausencia de hidróxido de calcio, los silicatos alcalinos pobres en calcio que se forman, pueden difundir por la pasta de cemento sin provocar los efectos perjudiciales propios de la reactividad.<sup>56,58,61</sup> Por otro lado, otros autores concluyen que el efecto más beneficioso que reportan estos materiales es la reducción de los álcalis y del

pH en las disoluciones de poro de hormigones y morteros, debida a la formación de aluminosilicatos.<sup>133</sup> Incluso Duchesne *et al.* llegan a fijar un valor límite de concentración de hidróxidos alcalinos de 0,65 N por debajo del cual se evita la aparición de expansiones en hormigones hechos con áridos muy reactivos ensayados por ellos.<sup>121</sup>

En este trabajo se han realizado ensayos con las pizarras como áridos y cenizas volantes como adición que sustituye parcialmente al clinker de cemento. Para ello, en lugar de hacer la sustitución en el laboratorio se ha trabajado con un cemento comercial que ya incluye dicha sustitución. Este cemento es el CEM IV/B (V) 32,5 N suministrado por Portland Valderrivas y su composición nominal, declarada por el fabricante e incluida en el capítulo 4, es de 56% de clinker, 41% de cenizas volantes silíceas y 3% de compuestos minoritarios.

Con estos materiales se lleva a cabo el ensayo acelerado en probetas de mortero. Se realizan series de probetas con dos filitas, la PIZ 1 y la PIZ 5, y dos esquistos, la PIZ 2 y la PIZ 4, utilizando el cemento tipo IV. Se miden las elongaciones de las probetas en varias ocasiones, durante los 28 días que se mantienen introducidas en disolución de NaOH 1N a 80 °C.

La gráfica obtenida como resultado de las mediciones se incluye en la Figura 6.55. En ella se puede observar que las probetas apenas sufren elongaciones durante los 28 días de ensayo, permaneciendo en todo momento muy por debajo del límite de 0,1% de elongación permitido en el ensayo acelerado en probetas de mortero.

No obstante, se debe señalar que existe una ligera tendencia ascendente en las curvas, que indica la posibilidad de que a muy largo plazo se puedan desarrollar expansiones superiores a las recomendables para hormigones y morteros.

Las superficies de las probetas no evidencian ningún proceso de fisuración en su observación visual.

De todos los sistemas probados, el uso de cemento con adiciones resulta el más prometedor a la hora de solucionar el problema que representa la reactividad de las pizarras para su uso en hormigones y morteros. El hecho de que esto se consiga con un cemento comercial de fácil acceso facilita mucho el estudio en laboratorio de los morteros realizados con pizarras y aumenta, en gran medida, las posibilidades de comercialización de los productos competitivos que se puedan lograr.

---

<sup>133</sup> Diamond, S. Proc. 6th Int. Conf. on AAR in Concrete, Copenhagen, Denmark, 155, (1983).

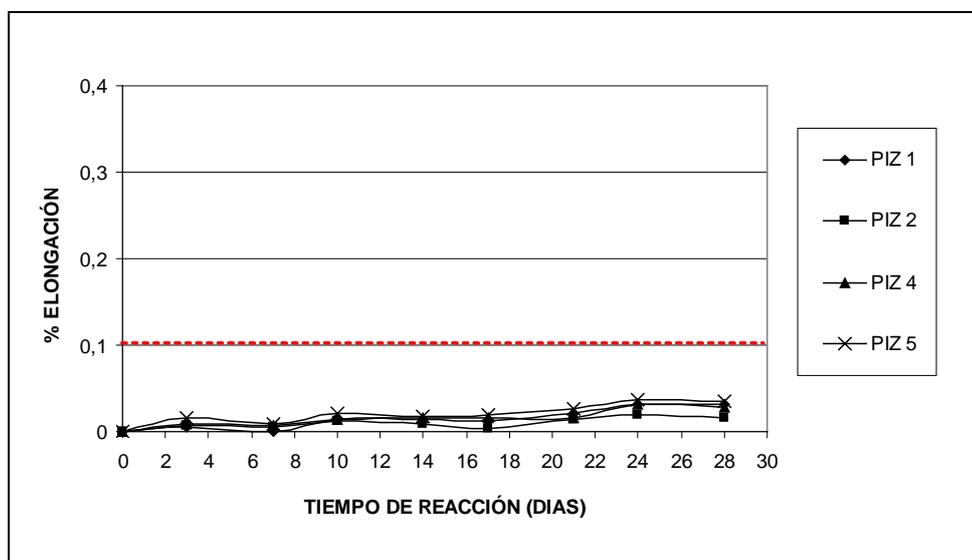


Figura 6.55. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas de mortero fabricadas con CEM IV/B (V) 32,5 N

### 6.3. Reactividad de las pizarras en los morteros iniciales

Para intentar valorar cómo se comportarán las pizarras en los morteros diseñados inicialmente se ha procedido a adaptar el ensayo acelerado en probetas de mortero. Dicha adaptación ha consistido en utilizar los cementos tipo II y IV que se han empleado en los morteros iniciales en lugar del tipo I, con alto contenido en álcalis, que se prescribe en la norma. En la Figura 6.56 se incluye la gráfica con las elongaciones de las probetas en función del tiempo.

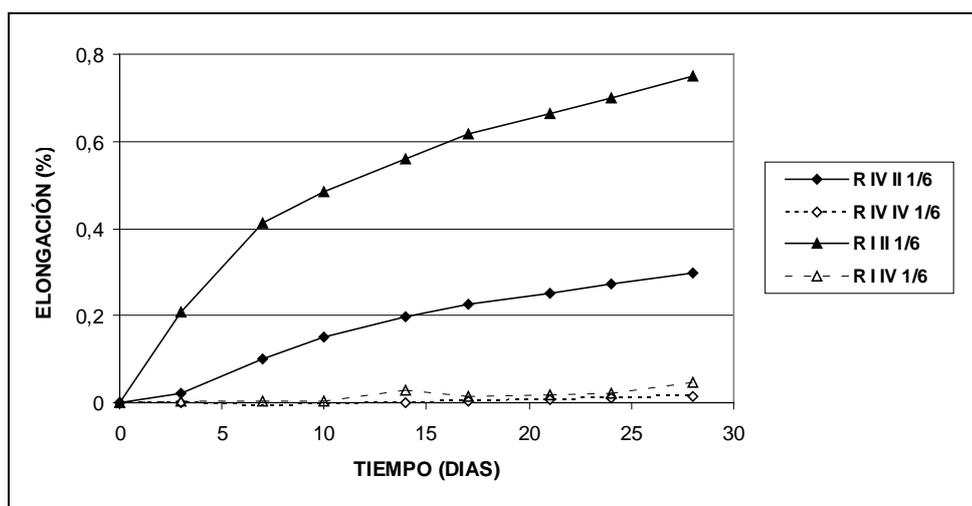


Figura 6.56. Gráfico elongación-tiempo de ensayo en probetas de mortero

Como se puede ver en el gráfico, los morteros realizados con CEM II manifiestan una reactividad de las pizarras semejante a la que se genera cuando se efectúa el ensayo con CEM I de alto contenido en álcalis. Esto se produce a pesar de que el óxido de sodio equivalente en el CEM II es de 0,53%, valor que no llega al límite inferior de 0,6% que un cemento ha de contener para ser declarado de alto contenido en álcalis.

Por otro lado el CEM IV, con un porcentaje en óxido de sodio equivalente ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) muy elevado, del 1,85%, proporciona morteros que prácticamente no sufren reactividad alguna. Esto indica que los áridos, en este caso las pizarras, se vuelven estables ante este tipo de reactividades cuando se trabaja con los cementos puzolánicos. Como se ha comprobado en el apartado anterior, la utilización de cementos puzolánicos es el método más adecuado para evitar la reactividad de las pizarras con los álcalis y así poder usar con seguridad estos áridos para la fabricación de morteros.

## **Capítulo 7: Mejora de los morteros mediante inclusión de aditivos**



## 7.1. Introducción

Las dosificaciones iniciales de los morteros de pizarra, aun mostrando propiedades muy positivas, presentan varias características que se deben mejorar para llegar a un producto de calidad.

Para conseguir estas mejoras se recurre a los aditivos, entendiendo como tales los materiales, de naturaleza orgánica o inorgánica, que se añaden en pequeñas cantidades, generalmente en porcentajes de peso respecto del contenido de cemento, con la finalidad de modificar una o varias características del mortero.

La condición de que los morteros que se pretenden conseguir en este trabajo sean morteros secos obliga a que los aditivos usados sean sólidos en polvo, lo que limita de forma importante el número y composición de los aditivos disponibles en el mercado.

A continuación, se presentan las modificaciones que se han realizado a las dosificaciones iniciales de mortero y se valoran los resultados en cuanto a la mejora o no de las propiedades a modificar y la conveniencia de la inclusión del aditivo.

## 7.2. Inclusión de aditivos en los morteros

### 7.2.1. Consideraciones iniciales

En este trabajo se van a utilizar distintos aditivos en función de sus actividades principales pero también de los efectos colaterales que producen, de tal forma que se consiga mejorar la mayor cantidad de propiedades con el menor número y cuantía de estos.

Para ello se procede a modificar las propiedades que se considera primordial mejorar, utilizando para ello los tipos de aditivos más adecuados. Se estudiarán las mejoras conseguidas en la propiedad en cuestión, pero también las variaciones que se hayan podido producir en las demás características fundamentales debido a las modificaciones incluidas.

En función de las mejoras conseguidas en las propiedades de los morteros, se pueden estudiar incorporaciones de varios aditivos con distintas actividades en una misma dosificación, para llegar a los morteros competitivos objetivo de esta Tesis Doctoral.

Los morteros iniciales sobre los que se va a actuar son el "R I IV 1/6" y el "R IV IV 1/6". Estos materiales cumplen con la premisa inicial que se debe mantener en los morteros modificados por los aditivos. Esta condición consiste en que para una consistencia normal de  $175 \pm 10$  mm de escurrimiento en la mesa de sacudidas, los morteros han de desarrollar resistencias superiores a la establecida de 7,5 MPa. Los morteros realizados con cemento tipo II se han descartado ya que, en el capítulo anterior, se ha

comprobado que son susceptibles de sufrir reactividad entre las pizarras y los álcalis.

### 7.2.2. Disminución del agua de amasado en el mortero

La primera modificación que se estudia es la disminución de la relación agua/cemento de las dosificaciones iniciales, para obtener morteros que mantengan la consistencia normal. De esta forma se pretende una mejora en la compacidad del mortero que supondría un aumento de las resistencias y de la durabilidad, como ya se ha comentado anteriormente.

Para conseguir esta disminución del agua de amasado se prueban dos aditivos aireantes, Premorter Mix 100 y Premorter Mix 112, un superplastificante, Prewflow 1000 y un plastificante, Premorter Mix 201. Estos aditivos se encuentran debidamente caracterizados en el capítulo 4.

#### 7.2.2.1. Dosificaciones estudiadas

Se ensayan diferentes porcentajes de los aditivos dosificados en % en peso sobre la cantidad de cemento. Los porcentajes se eligen teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante y la dificultad extra que supone la forma de las partículas de los áridos, un tanto aplanadas. Así, las dosificaciones probadas se incluyen en la Figura 7.1.

Se realizan amasadas con distintas relaciones agua/cemento y se comprueba la consistencia de los morteros en la mesa de sacudidas según la norma UNE-EN 1015-2 hasta llegar a la consistencia normal de  $175 \pm 10$  mm.

MORTERO	CEMENTO	ARENA	ADITIVO	CANTIDAD ADITIVO (%)
MI 0,75 PM100	CEM IV	PIZARRA 1	PREMORTER MIX 100	0,75
MI 1,25 PM100			MIX 100	1,25
MI 0,75 PM112			PREMORTER MIX 112	0,75
MI 1,25 PM112			MIX 112	1,25
MI 1,5 PF1000			PREFLOW 1000 P	1,5
MI 2,5 PF1000			1000 P	2,5
MI 1,0 PM201			PREMORTER MIX 201	1,0
MI 2,0 PM201			MIX 201	2,0
MIV 0,75 PM100		PIZARRA 4	PREMORTER MIX 100	0,75
MIV 1,25 PM100			MIX 100	1,25
MIV 0,75 PM112			PREMORTER MIX 112	0,75
MIV 1,25 PM112			MIX 112	1,25
MIV 1,5 PF1000			PREFLOW 1000 P	1,5
MIV 2,5 PF1000			1000 P	2,5
MIV 1,0 PM201			PREMORTER MIX 201	1,0
MIV 2,0 PM201			MIX 201	2,0

Figura 7.1. Dosificaciones de mortero con distintos tipos y porcentajes de aditivo

### 7.2.2.2. Resultados obtenidos

En la Figura 7.2 se incluyen los datos de cantidades de agua y relaciones agua/cemento de los morteros de referencia y de los modificados con aditivos, así como los escurrimientos obtenidos con esas relaciones.

Como se puede ver en la tabla, las actividades en cuanto a la disminución de la relación agua/cemento difieren de forma importante en función del tipo y cantidad de aditivo que se incorpora al mortero. Los resultados van desde dosificaciones que requieren mayor cantidad de agua de amasado hasta otras en las que la cantidad de agua requerida disminuye en más del 20%, pasando por muestras en las que la actividad del aditivo pasa prácticamente inadvertida.

La conveniencia o no del uso de unos u otros aditivos vendrá determinada por los efectos colaterales que presenten, de manera que, de ser posible, se mejoren otras características significativas del mortero o que, por lo menos, no decaigan éstas dando lugar a un mortero de peores cualidades en conjunto.

MORTERO	AGUA (kg por 100 kg mortero)	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO mm.
R I IV 1/6	15,9	1,11	176
MI 0,75 PM100	15,5	1,08	177
MI 1,25 PM100	15,3	1,07	175
MI 0,75 PM112	15,0	1,05	175
MI 1,25 PM112	14,7	1,03	176
MI 1,5 PF1000	13,6	0,95	178
MI 2,5 PF1000	12,4	0,86	175
MI 1,0 PM201	16,5	1,16	180
MI 2,0 PM201	16,1	1,13	165
R IV IV 1/6	16,6	1,16	180
MIV 0,75 PM100	16,6	1,16	178
MIV 1,25 PM100	16,2	1,14	178
MIV 0,75 PM112	15,9	1,11	173
MIV 1,25 PM112	15,6	1,09	177
MIV 1,5 PF1000	13,6	0,95	182
MIV 2,5 PF1000	14,7	1,03	197
MIV 1,0 PM201	17,6	1,23	182
MIV 2,0 PM201	16,1	1,15	169

Figura 7.2. Relaciones agua/cemento y escurrimientos para las dosificaciones con aditivos

### 7.2.3. Variaciones en las resistencias mecánicas

Como se ha comentado anteriormente, los morteros modificados han de cumplir con la premisa de alcanzar la resistencia mínima establecida en su definición. De esta forma se estudian las variaciones producidas en las resistencias de las dosificaciones con la inclusión de los aditivos. Los resultados se recogen en la Figura 7.3. Para completar los datos de estas muestras, se incluyen las resistencias a flexión y compresión a 7 y 28 días.

Los resultados recogidos en la tabla varían mucho en función del tipo de aditivo usado. Por un lado, los morteros que incluyen aireantes mantienen o disminuyen ligeramente sus resistencias mecánicas, mientras que aquellos que incluyen superplastificante aumentan de forma muy notoria estas resistencias con respecto al mortero de inicio. Los morteros aditivados con el plastificante son los que se comportan de forma más negativa, sufriendo

pérdidas acusadas en las resistencias a compresión, más manifiestas en las muestras de pizarra 4.

MORTERO	FLEXIÓN 7d (N/mm <sup>2</sup> )	COMPRESIÓN 7d (N/mm <sup>2</sup> )	FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )
R I IV 1/6	1,5	5,9	3,1	9,9
MI 0,75 PM100	2,1	6,8	2,7	8,9
MI 1,25 PM100	2,1	5,9	3,2	8,8
MI 0,75 PM112	1,9	6,1	2,8	9,9
MI 1,25 PM112	2,2	5,9	3,2	9,3
MI 1,5 PF1000	2,0	6,8	3,0	13,2
MI 2,5 PF1000	3,6	11,9	4,7	16,3
MI 1,0 PM201	1,4	3,6	2,2	7,9
MI 2,0 PM201	1,6	4,0	2,4	8,4
R IV IV 1/6	1,8	6,0	2,6	9,1
MIV 0,75 PM100	1,8	6,6	2,5	8,4
MIV 1,25 PM100	1,6	6,9	2,3	8,9
MIV 0,75 PM112	1,5	6,3	2,1	8,7
MIV 1,25 PM112	1,7	4,8	2,7	9,0
MIV 1,5 PF1000	2,3	7,6	3,9	11,6
MIV 2,5 PF1000	2,6	8,7	3,3	13,0
MIV 1,0 PM201	1,4	3,4	2,4	7,7
MIV 2,0 PM201	1,1	3,3	2,3	7,4

Figura 7.3. Resistencias mecánicas de las dosificaciones con aditivos

#### 7.2.4. Variaciones en las densidades aparentes y en el contenido en aire del mortero

Los aditivos que se incluyen en las dosificaciones dan lugar a modificaciones en las densidades aparentes en el mortero fresco y endurecido, así como en el contenido en aire. En este apartado se tratan estas características conjuntamente, ya que todas están directamente relacionadas.

Morteros frescos densos contienen, por lo general, bajos contenidos en aire mientras que, por el contrario, un aumento del contenido de aire de estos conlleva una disminución de la densidad.

En la Figura 7.4 se incluyen los datos obtenidos para estas propiedades en los morteros modificados con aditivos.

MORTERO	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	CONTENIDO AIRE (%)
R I IV 1/6	2210	2050	4,0
MI 0,75 PM100	2100	1940	9,4
MI 1,25 PM100	2070	1920	11,0
MI 0,75 PM112	2090	1930	10,5
MI 1,25 PM112	2070	1920	11,8
MI 1,5 PF1000	2250	2060	4,6
MI 2,5 PF1000	2260	2060	5,8
MI 1,0 PM201	2180	1960	4,8
MI 2,0 PM201	2150	1950	6,2
R IV IV 1/6	2210	1990	3,0
MIV 0,75 PM100	2050	1870	10,0
MIV 1,25 PM100	2050	1880	10,2
MIV 0,75 PM112	2050	1900	10,5
MIV 1,25 PM112	2040	1910	11,8
MIV 1,5 PF1000	2210	2000	3,8
MIV 2,5 PF1000	2220	2000	4,0
MIV 1,0 PM201	2150	1940	4,5
MIV 2,0 PM201	2110	1910	6,2

Figura 7.4. Densidades aparentes y contenido de aire de las dosificaciones con aditivos

De nuevo se observan tres actividades diferentes. Los aditivos aireantes introducen gran cantidad de aire, lo que se refleja en el incremento en el contenido de aire y también en las importantes disminuciones de las densidades tanto en fresco como en seco.

En cuanto a los morteros con aditivo superplastificante, las densidades en fresco aumentan en todos los casos, aunque de forma más acusada en los morteros con pizarra 1, mientras que las densidades en los morteros endurecidos sufren ligeros aumentos solamente, al igual que los contenidos en aire.

Las mezclas con aditivo plastificante tienen densidades, tanto en fresco como en seco, menores que los morteros iniciales, y el contenido en aire es mayor que en estos. Sin embargo estas diferencias son mucho menores que las de los morteros con aditivos aireantes.

### 7.2.5. Variaciones en la resistencia a la adhesión del mortero

En la Figura 7.5, incluida a continuación, se recogen los resultados del ensayo de resistencia a la adhesión llevado a cabo con las dosificaciones que incluyen los aditivos ensayados.

Los aditivos aireantes disminuyen ligeramente la resistencia a la adhesión de los morteros, aunque los valores siguen siendo superiores a los declarados en las fichas técnicas de los morteros que se comercializan. Las adherencias aumentan de forma importante en los morteros con superplastificante, mientras que en los que contienen plastificante aumentan también, pero solo ligeramente. Cabe destacar las muy altas adherencias de las dosificaciones que incluyen superplastificante y pizarra 1.

MORTERO	RESISTENCIA A LA ADHESIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO DE ROTURA
R I IV 1/6	0,45	A (ADHESIVA)
MI 0,75 PM100	0,35	A
MI 1,25 PM100	0,31	A
MI 0,75 PM112	0,39	A
MI 1,25 PM112	0,49	A
MI 1,5 PF1000	1,00	C (COHESIVA SOPORTE)
MI 2,5 PF1000	0,83	B (COHESIVA MORTERO)
MI 1,0 PM201	0,48	A
MI 2,0 PM201	0,51	A
R IV IV 1/6	0,52	A
MIV 0,75 PM100	0,33	A
MIV 1,25 PM100	0,31	A
MIV 0,75 PM112	0,38	A
MIV 1,25 PM112	0,41	A
MIV 1,5 PF1000	0,53	B
MIV 2,5 PF1000	0,68	B
MIV 1,0 PM201	0,53	B
MIV 2,0 PM201	0,50	B

Figura 7.5. Resistencia a la adhesión de las dosificaciones con aditivos

A continuación se incluyen imágenes a modo de ejemplo de los tres tipos de rotura que se han producido en las distintas dosificaciones.

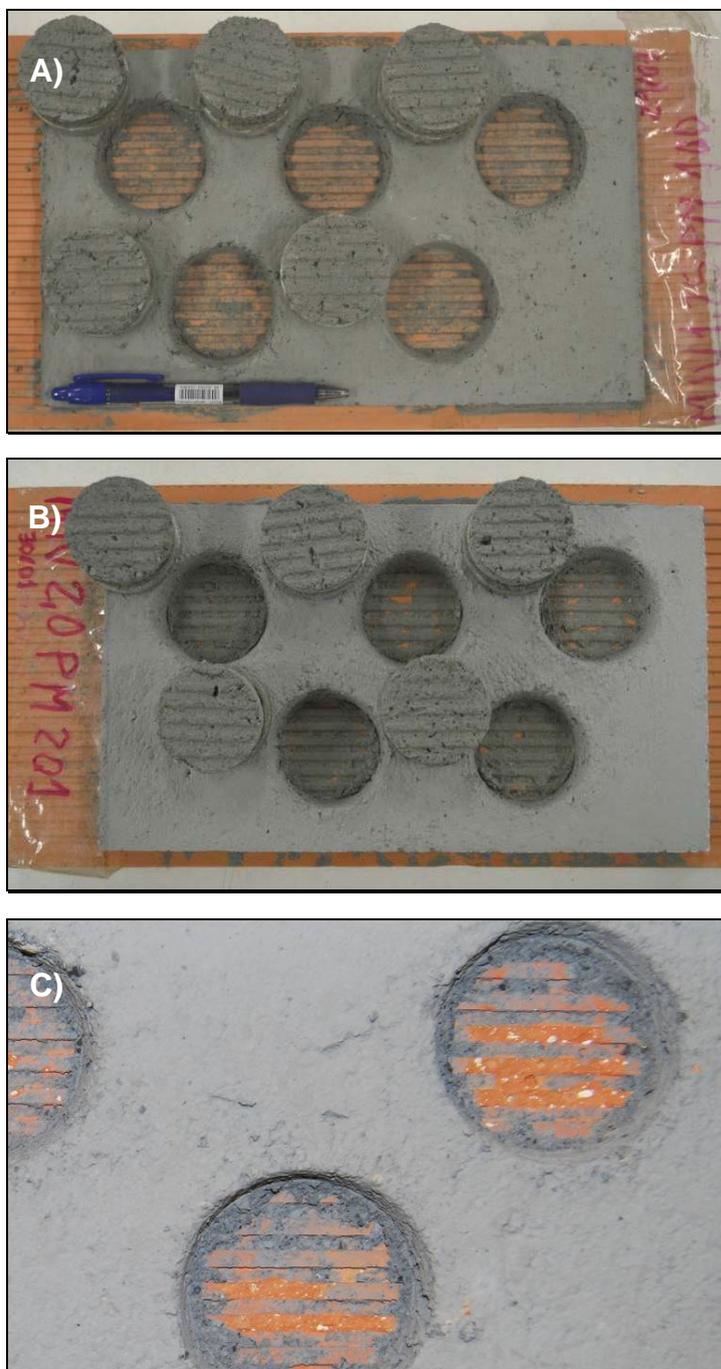


Figura 7.6. Distintos tipos de rotura en el ensayo de adherencia. A) Rotura adhesiva de la dosificación MIV 1,25 PM 100; B) Rotura cohesiva en el mortero de la dosificación MIV 2,0 PM 201; C) Detalle de la rotura cohesiva en el soporte de la dosificación MI 1,5 PF 1000

### 7.2.6. Variaciones en la retención de agua en el mortero fresco

Los distintos aditivos probados producen variaciones en los porcentajes de agua que retienen los morteros. En la Figura 7.7 se incluyen estos datos, junto con las cantidades de agua de amasado y las relaciones agua/cemento de cada dosificación.

Los datos de porcentajes de retención de agua reflejan que los aditivos aireantes disminuyen la capacidad de los morteros de retener el agua de amasado, mientras que el superplastificante y el plastificante facilitan que el agua permanezca en el interior de la masa de mortero de una forma más persistente.

MORTERO	AGUA (kg por100 kg mortero)	RELACIÓN A/C	RETENCIÓN DE AGUA (%)
R I IV 1/6	15,9	1,11	86
MI 0,75 PM100	15,5	1,08	84
MI 1,25 PM100	15,3	1,07	86
MI 0,75 PM112	15,0	1,05	85
MI 1,25 PM112	14,7	1,03	86
MI 1,5 PF1000	13,6	0,95	89
MI 2,5 PF1000	12,4	0,86	94
MI 1,0 PM201	16,5	1,16	88
MI 2,0 PM201	16,1	1,13	92
R IV IV 1/6	16,6	1,16	87
MIV 0,75 PM100	16,6	1,16	83
MIV 1,25 PM100	16,2	1,14	86
MIV 0,75 PM112	15,9	1,11	85
MIV 1,25 PM112	15,6	1,09	84
MIV 1,5 PF1000	13,6	0,95	89
MIV 2,5 PF1000	14,7	1,03	93
MIV 1,0 PM201	17,6	1,23	90
MIV 2,0 PM201	16,1	1,15	91

Figura 7.7. Porcentajes de retención de agua de las dosificaciones con aditivos. Se incluyen las cantidades de agua en cada dosificación así como la relación agua/cemento

### 7.2.7. Variaciones en el período de trabajabilidad

El período de trabajabilidad de los morteros varía muy sensiblemente en función del aditivo introducido. En la tabla de la Figura 7.8 se presentan los valores de los tiempos abiertos de las distintas dosificaciones.

Los aditivos aireantes permiten los mayores tiempos de trabajabilidad, siendo el Premorter Mix 112 el que prolonga más el tiempo abierto. El superplastificante aumenta muy poco el tiempo abierto con relación a los morteros de inicio, mientras que el plastificante se aproxima a los aireantes en cuanto a actividad.

MORTERO	RELACIÓN A/C	TRABAJABILIDAD (min.)
R I IV 1/6	1,11	72
MI 0,75 PM100	1,08	142
MI 1,25 PM100	1,07	156
MI 0,75 PM112	1,05	128
MI 1,25 PM112	1,03	180
MI 1,5 PF1000	0,95	79
MI 2,5 PF1000	0,86	77
MI 1,0 PM201	1,16	114
MI 2,0 PM201	1,13	143
R IV IV 1/6	1,16	55
MIV 0,75 PM100	1,16	154
MIV 1,25 PM100	1,14	158
MIV 0,75 PM112	1,11	98
MIV 1,25 PM112	1,09	190
MIV 1,5 PF1000	0,95	55
MIV 2,5 PF1000	1,03	59
MIV 1,0 PM201	1,23	143
MIV 2,0 PM201	1,15	186

Figura 7.8. Período de trabajabilidad de las dosificaciones con aditivos. Se incluye también la relación agua/cemento de cada dosificación

### 7.2.8. Valoración de las modificaciones realizadas

A continuación se comparan las características de los morteros modificados por los aditivos y se valora la conveniencia o no del uso de estos para la mejora de las calidades generales de los morteros diseñados.

#### 7.2.8.1. Relación agua/cemento vs. resistencia a compresión

En los gráficos de las Figuras 7.9 y 7.10 se presentan emparejados los valores de las relaciones agua/cemento que los morteros con aditivos requieren para alcanzar la consistencia normal y los valores de las resistencias a compresión de dichos morteros.

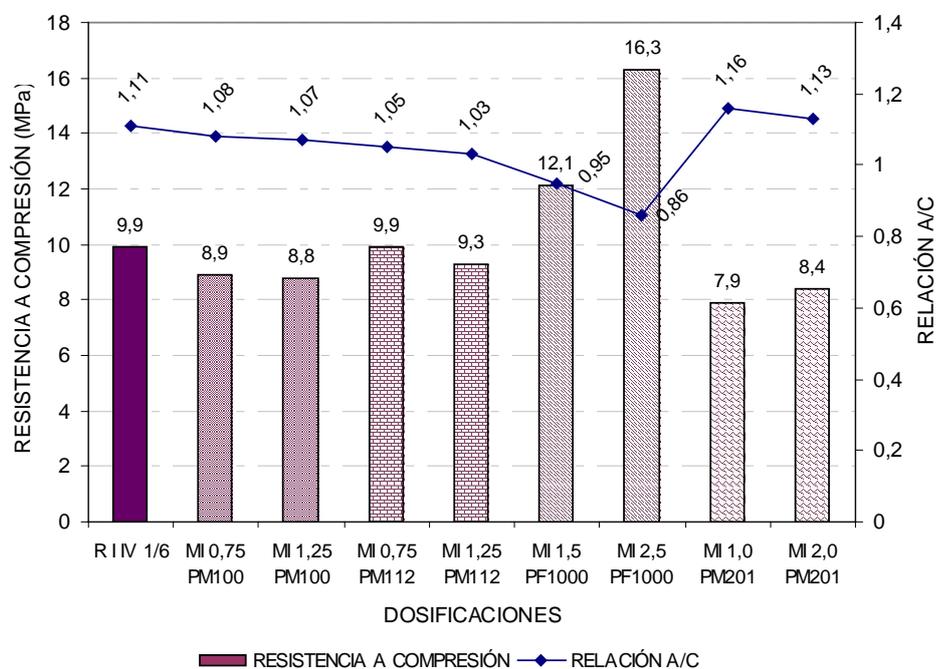


Figura 7.9. Relación A/C vs Resistencia a Compresión en morteros con PIZ I. Se incluyen mortero de inicio y morteros con aditivos

En los morteros de ambas pizarras el comportamiento de los aditivos es bastante semejante. En cuanto a las relaciones agua/cemento se producen disminuciones de estas relaciones con todos los aditivos excepto con el plastificante, que incrementa ligeramente la cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia normal.

Los morteros con el aditivo superplastificante Prewflow 1000 P son los que alcanzan relaciones agua/cemento menores, con importantes disminuciones en la cantidad de agua. Al mismo tiempo estos morteros presentan marcados aumentos en sus resistencias a compresión.

De los aditivos aireantes probados, el Premorter Mix 112 presenta una mayor actividad en cuanto a disminución de la relación agua/cemento manteniendo buenas resistencias a compresión. El Premorter Mix 100 reduce en muy poca cantidad el agua de amasado y, además, presenta ligeras disminuciones en las resistencias a compresión.

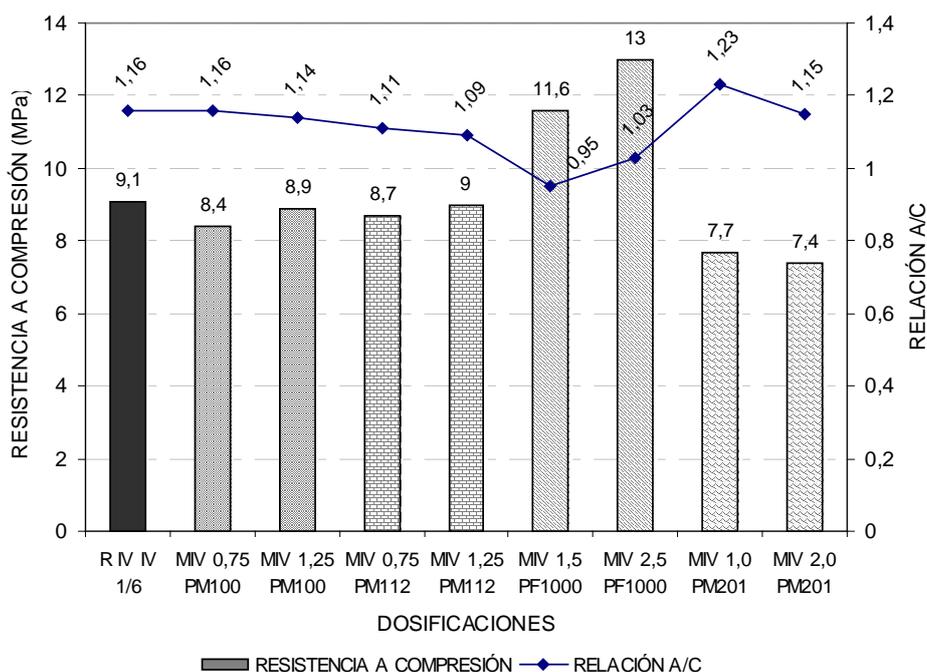


Figura 7.10. Relación A/C vs Resistencia a Compresión en morteros con PIZ IV. Se incluyen mortero de inicio y morteros con aditivos

### 7.2.8.2. Densidad y contenido en aire del mortero fresco

Los valores de estas propiedades son de gran importancia cuando se considera la manejabilidad del mortero por parte del profesional que lo va a trabajar. Cuanto menor sea la densidad del mortero fresco, este resultará menos pesado y, por tanto, más fácilmente trabajable, por lo que es deseable que los morteros frescos tengan densidades bajas. Esto se puede alcanzar de varias formas, una de ellas es aumentando la cantidad de aire ocluido en el mortero.

En las Figuras 7.11 y 7.12 se ilustran gráficamente los datos obtenidos para las dosificaciones de morteros con aditivos, incluidos en la tabla de la Figura 7.4.

En los gráficos se advierten las diferentes variaciones que se producen en los morteros en función del tipo de aditivo utilizado. El superplastificante da lugar a morteros de densidades mayores incluso que las del mortero de inicio, con

modificaciones poco importantes en cuanto al contenido en aire en el interior del mortero.

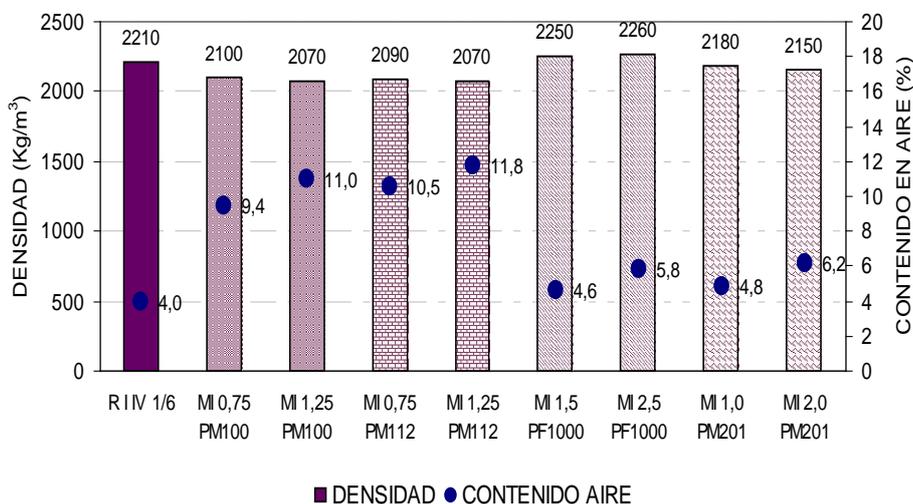


Figura 7.11. Densidad aparente y contenido en aire en morteros con PIZ I. Se incluyen mortero de inicio y morteros con aditivos.

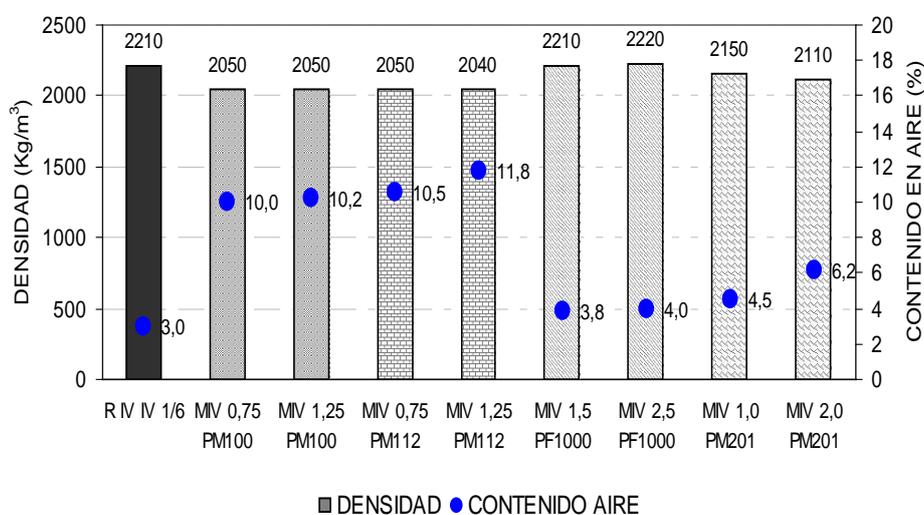


Figura 7.12. Densidad aparente y contenido en aire en morteros con PIZ IV. Se incluyen mortero de inicio y morteros con aditivos

En el lado opuesto las dosificaciones que incluyen aditivos aireantes presentan importantes disminuciones en cuanto a la densidad. Esto se consigue mediante la inclusión, en los morteros, de pequeñas microburbujas de aire lo cual repercute, lógicamente, en un gran aumento en el contenido en aire de los mismos. Además de estos efectos, la inclusión de microburbujas de aire ejerce un efecto lubricante, disminuyendo la fricción entre los

componentes de los morteros lo que hace que éstos se muevan con menos esfuerzo y resulten mucho más fácilmente trabajables.

Por último el plastificante produce pequeñas disminuciones en las densidades con aumentos en el contenido en aire que también resultan de poca importancia.

### 7.2.9. Análisis y evaluación de los resultados obtenidos con la inclusión de aditivos

Con los resultados obtenidos se pueden hacer varias reflexiones en cuanto a los comportamientos de los morteros que incluyen aditivos, lo que permite acotar las dosificaciones que presentan mejoras sustanciales con respecto a los morteros iniciales.

Con la inclusión de aditivos se buscaban varias mejoras en los morteros de inicio descritos en profundidad en el capítulo 5.

En primer lugar una reducción de las relaciones agua/cemento para la mejora en la durabilidad del mortero disminuyendo la capilaridad de estos y, por tanto, la permeabilidad al agua.

También se pretendía una disminución de la densidad y un aumento del contenido en aire para facilitar la manipulación del mortero en estado fresco y no incrementar en exceso el peso de las unidades de obra ejecutadas con estos materiales.

Otro parámetro a mejorar es la adherencia del material al soporte en que se va a aplicar, aunque las adherencias mostradas por los morteros de referencia son bastante elevadas.

También es deseable un aumento del período de trabajabilidad de los morteros para tener un mayor margen para su puesta en obra, así como una mejora en la retención de agua para evitar exudaciones en el material.

Todas estas mejoras se deben conseguir manteniendo las resistencias mecánicas por encima de las premisas iniciales establecidas.

El comportamiento de los morteros con los distintos aditivos en cuanto a las características anteriormente mencionadas se resume a continuación:

- Los aditivos aireantes producen reducciones apreciables de la relación agua/cemento, disminuyen de forma muy importante las densidades y aumentan muy sensiblemente el contenido de aire de los morteros. También aumentan ampliamente el período de trabajabilidad para la utilización de los materiales. Por otro lado, no mejoran las resistencias a la adhesión de los morteros de referencia ni tampoco producen mejoras en la retención de agua. Aunque mantienen buenos valores de resistencias a compresión, estas disminuyen ligeramente con respecto a los morteros de inicio. En

cualquier caso el comportamiento de los morteros con el aditivo Premorter Mix 112 es mejor en prácticamente todos los aspectos que el de los morteros con Premorter Mix 100.

- El aditivo superplastificante permite las mayores reducciones de las relaciones agua/cemento de todos los aditivos probados, lo que deriva en un enorme aumento de las resistencias a compresión. Los morteros con este aditivo retienen mejor el agua y presentan los mejores valores de adherencia al soporte. Por el contrario el contenido en aire no se ve incrementado de forma importante y las densidades, tanto en el mortero fresco como en el endurecido, son elevadas, llegando a sobrepasar a las de las muestras de referencia. Esto hace que los morteros resulten más pesados y difíciles de manipular que los que inicialmente se pretenden mejorar. Además el período de trabajabilidad no aumenta excesivamente.
- El aditivo plastificante no muestra efectividad en la reducción de las cantidades de agua que se necesitan para alcanzar las consistencias requeridas en los morteros, de hecho se obtienen mayores relaciones agua/cemento. No aumenta apreciablemente el contenido de aire y las disminuciones de las densidades son poco significativas. La adherencia no sufre variaciones reseñables con respecto a los morteros de inicio. Como aspectos positivos, los morteros con este aditivo retienen mejor el agua y aumentan de forma importante el período de trabajabilidad para su utilización.

Los resultados obtenidos evidencian que ninguno de los aditivos por si solos da lugar a un mortero con las características idóneas. De todos los estudiados, los mejores comportamientos corresponden a los morteros realizados con el aireante Premorter Mix 112 en un porcentaje en peso de cemento del 1,25; tanto para el árido de Pizarra 1 como el de Pizarra 4. Estos morteros muestran muy buenas aptitudes en cuanto a manipulación y puesta en obra, con densidades bajas y microburbujas de aire en su interior que fluidifican la masa. Permanecen trabajables un amplio espacio de tiempo y mantienen las resistencias y la adherencia, aunque retienen ligeramente peor el agua, lo que se nota por la aparición de trazas de agua superficial cuando el material se mantiene inmóvil en el recipiente una vez amasado.

Las mezclas que incluyen el Prewflow 1000 P son muy densas y requieren grandes esfuerzos para su manipulación, además de permanecer un tiempo muy corto en estado plástico trabajable. Por su parte, los morteros aditivados con el plastificante Premorter Mix 201 sólo mejoran a los de inicio en la retención de agua y en el tiempo que permanecen trabajables pero su actividad pasa bastante desapercibida.

### **7.3. Estudio de mejoras mediante combinación de aditivos en el mortero**

Las dosificaciones con el aditivo Premorter Mix 112 alcanzan niveles aceptables de calidad, muy similares a los morteros disponibles en el mercado, pero todavía existen posibilidades de mejora de algunas características para conseguir un producto final superior.

Para ello se estudian combinaciones de aditivos que, por sus cualidades, se prevé que produzcan un efecto conjunto de mejora sobre las características susceptibles de ello.

A continuación se presentan algunas de las dosificaciones con mezclas de aditivos que se han estudiado y los resultados que se han conseguido con estas combinaciones.

#### **7.3.1. Combinaciones de aireantes y polímeros dispersables**

Atendiendo a los resultados obtenidos con la utilización de aireantes, se valora incluir otros aditivos para la mejora de la adherencia y la retención de agua. Para ello se han probado los polímeros dispersables de la marca Vinnapas, descritos en el capítulo 4. Estos polímeros trabajan formando una red o película polimérica tridimensional en el mortero que, teóricamente, mejora varias características de éste, fundamentalmente la adherencia sobre soportes complicados o la cohesión del mortero.

##### **7.3.1.1. Dosificaciones**

Las dosificaciones probadas se incluyen en el cuadro de la Figura 7.13. Se ensayan combinaciones de los aireantes, en porcentajes en peso de cemento ya probados anteriormente, con los dos polímeros dispersables en porcentajes que, inicialmente, atienden a las sugerencias del fabricante.

MORTERO	ARENA	ADITIVO	CANTIDAD (%)	ADITIVO	CANTIDAD (%)
MI 0,75PM100 1,0V5010N	PIZARRA 1	PREMOR TER MIX 100	0,75	VINNAPAS 5010 N	1,0
MI 0,75PM100 2,0V5010N			0,75	VINNAPAS 5010 N	2,0
MI 1,25PM100 2,0V5010N			1,25	VINNAPAS 5010 N	2,0
MI 0,75PM112 2,0V5010N		PREMOR TER MIX 112	0,75	VINNAPAS 5010 N	2,0
MI 1,25PM112 2,0V5010N			1,25	VINNAPAS 5010 N	2,0
MI 1,25PM112 2,0V7031H			1,25	VINNAPAS 7031 H	2,0
MIV 1,25PM100 2,0V5010N	PIZARRA 4	PREMOR TER MIX 100	1,25	VINNAPAS 5010 N	2,0
MIV 1,25PM100 2,0V7031H			1,25	VINNAPAS 7031 H	2,0
MI 0,75PM112 2,0V5010N		PREMOR TER MIX 112	0,75	VINNAPAS 5010 N	2,0
MIV 1,25PM112 2,0V5010N			1,25	VINNAPAS 5010 N	2,0
MIV 1,25PM112 2,0V7031H			1,25	VINNAPAS 7031 H	2,0

Figura 7.13. Dosificaciones de mortero con aditivos aireantes y polímeros dispersables

### 7.3.1.2. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 1

Los resultados de los ensayos de las dosificaciones que incluyen los polímeros dispersables se presentan a continuación en las Figuras 7.14 y 7.15.

MORTERO	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO (mm)
MI 0,75PM100 1,0V5010N	1,11	179
MI 0,75PM100 2,0V5010N	1,08	178
MI 1,25PM100 2,0V5010N	1,04	169
MI 0,75PM112 2,0V5010N	1,06	184
MI 1,25PM112 2,0V5010N	1,05	177
MI 1,25PM112 2,0V7031H	1,08	181

MORTERO	CONTENIDO AIRE (%)	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)
MI 0,75PM100 1,0V5010N	10,5	2060	88
MI 0,75PM100 2,0V5010N	17,5	1910	87
MI 1,25PM100 2,0V5010N	13,0	2010	88
MI 0,75PM112 2,0V5010N	21,0	1890	86
MI 1,25PM112 2,0V5010N	17,5	1930	88
MI 1,25PM112 2,0V7031H	10,5	2060	89

Figura 7.14. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco en dosificaciones con PIZ 1 que incluyen aireante y polímero dispersable

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )
MI 0,75PM100 1,0V5010N	2,7	7,5
MI 0,75PM100 2,0V5010N	2,4	6,6
MI 1,25PM100 2,0V5010N	3,2	7,8
MI 0,75PM112 2,0V5010N	2,3	7,6
MI 1,25PM112 2,0V5010N	2,9	7,1
MI 1,25PM112 2,0V7031H	3,5	8,9

MORTERO	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A LA ADHESIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
MI 0,75PM100 1,0V5010N	1910	0,30	0,32 (19) <sup>1</sup>
MI 0,75PM100 2,0V5010N	1830	0,30	0,30 (19)
MI 1,25PM100 2,0V5010N	1890	0,36	0,25 (13)
MI 0,75PM112 2,0V5010N	1840	0,35	0,23 (15)
MI 1,25PM112 2,0V5010N	1870	0,29	0,20 (13)
MI 1,25PM112 2,0V7031H	1930	0,30	0,14 (6)

<sup>1</sup> Penetración del agua en la probeta en mm.

Figura 7.15. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido en dosificaciones con PIZ 1 que incluyen aireante y polímero dispersable

Los efectos producidos por los polímeros dispersables en los morteros con PIZ 1 y aireante son muy novedosos, ya que no se consiguen las mejoras esperadas en las características sobre las que, supuestamente, estos aditivos desarrollan su actividad principal, pero sí se observan efectos en propiedades colaterales, que se ven mejoradas por la adición de los polímeros.

○ En cuanto a las **resistencias**, tanto las mecánicas como la resistencia a la adherencia, no solo no mejoran sino que disminuyen cuando se comparan con el mortero con aireante que presenta las mejores características, esto es, el que incluye un 1,25% en peso de cemento de aireante Premorter Mix 112, denominado MI 1,25PM112.

Como se puede observar en el gráfico de la Figura 7.16, las resistencias a compresión a 28 días disminuyen sensiblemente cuando se añade el aditivo VINAPPAS 5010N. En estas dosificaciones las resistencias están por debajo o ligeramente por encima del valor de 7,5 MPa, que es el límite inferior que se ha establecido en esta Tesis para los morteros con pizarra, y muy por debajo de 9,3 MPa (línea roja en el gráfico), valor de resistencia que presenta el mortero con aireante referido en el párrafo anterior.

En cuanto al mortero con aditivo VINAPPAS 7031H, la disminución de la resistencia a compresión con respecto al mortero con aireante es mucho menor, con lo que se mantiene un margen de seguridad importante con relación a la resistencia límite de 7,5 MPa.

La adherencia de los morteros que incluyen los dos tipos de aditivos disminuye de forma notable con respecto al mortero con el aireante que se pretende mejorar (línea azul en el gráfico). A pesar de ello se mantienen valores en torno o por encima del valor de referencia de 0,3 N/mm<sup>2</sup>.

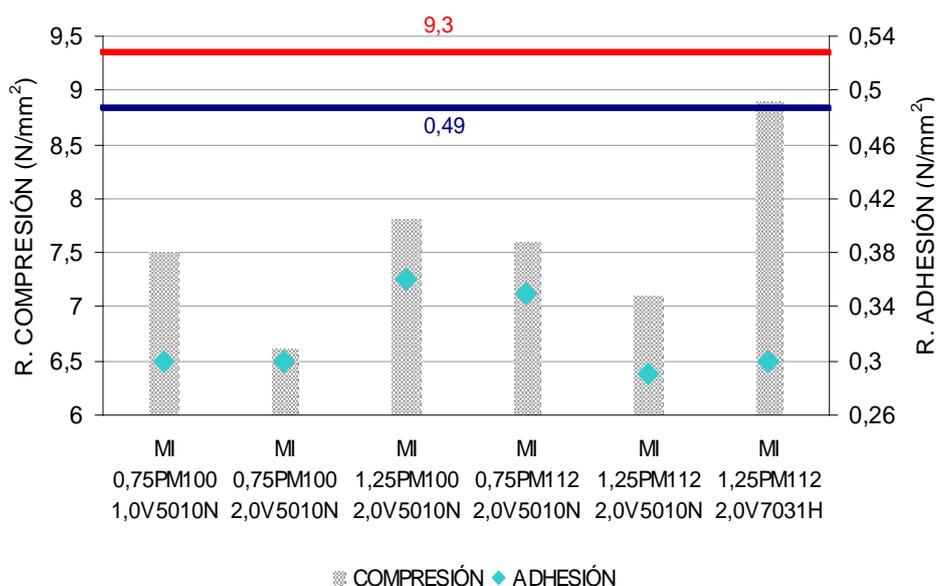


Figura 7.16. Gráfico de resistencia a compresión y resistencia a la adhesión de los morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y polímero dispersable en comparación con MI 1,25PM112

o Los **coeficientes de absorción de agua por capilaridad** de los morteros que incluyen aireante y polímero son superiores al que presenta el mortero que solo contiene aireante, y la altura de penetración del agua en las probetas también es superior. La excepción la presenta el mortero que incluye el polímero con propiedades de hidrofugante, VINAPPAS 7031H (Figura 7.17). En este caso la absorción disminuye apreciablemente y esto se refleja en la altura que alcanza el agua en las probetas ensayadas (Figura 7.18).

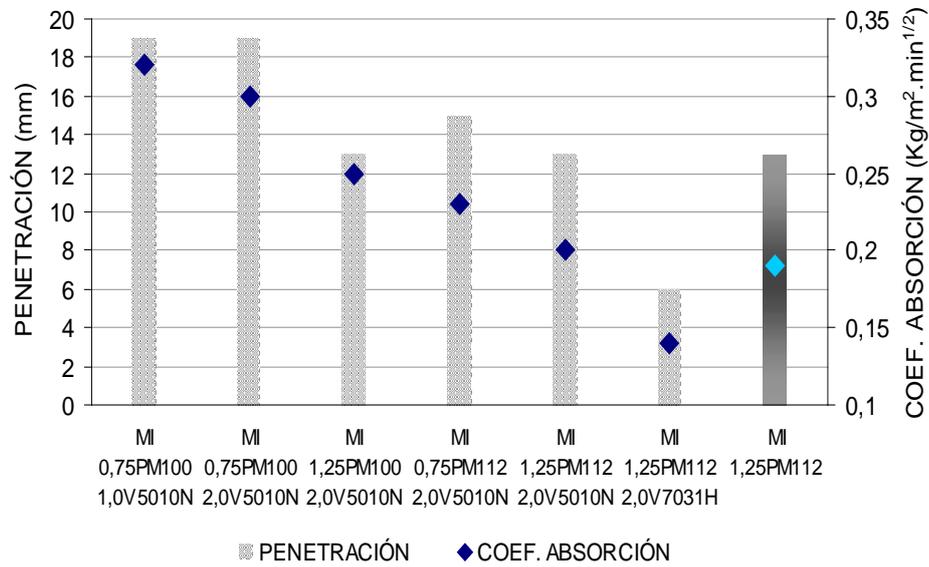


Figura 7.17. Gráfico de penetración de agua por capilaridad y coeficiente de absorción por capilaridad en morteros con PIZ 1 que incluyen dos aditivos, en comparación con MI 1,25PM112

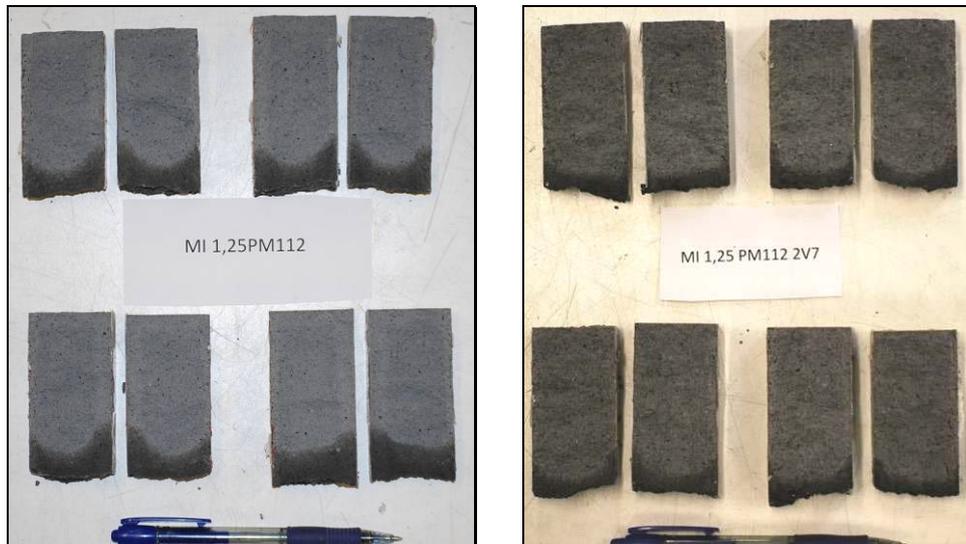


Figura 7.18. Penetración del agua en probetas sometidas al ensayo de absorción de agua por capilaridad en las dosificaciones MI 1,25PM112 y MI 1,25PM112 2,0V7031H

o La **densidad** de los morteros en estado fresco disminuye en todos los casos con la inclusión de los polímeros a las dosificaciones con aireante. Esta disminución es más sensible en las dosificaciones que contienen menor porcentaje de aireante, lo que parece indicar que la actividad de éste no se ve potenciada por la presencia del polímero sino más bien al contrario. En cualquier caso la disminución de las densidades conlleva una mejora en la manejabilidad de los morteros.

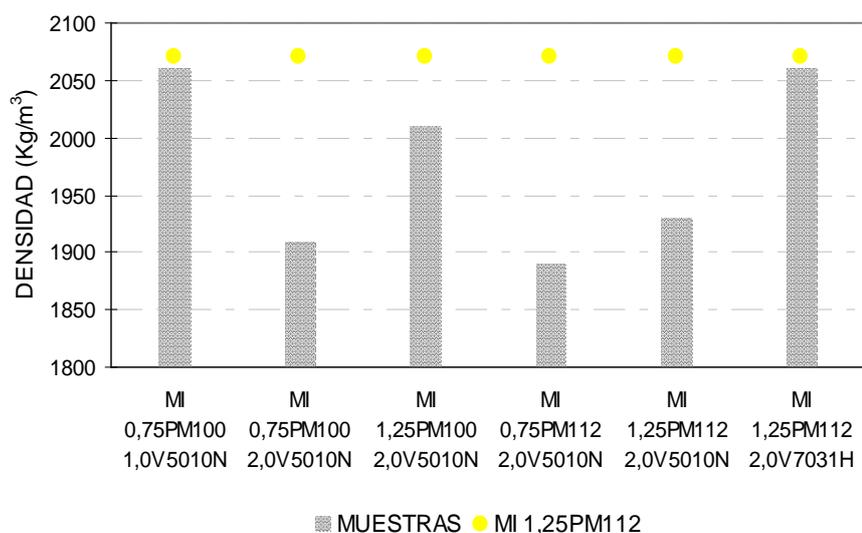


Figura 7.19. Gráfico de densidad del mortero fresco en morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y polímero dispersable, en comparación con MI 1,25PM112

o El **contenido en aire** en los morteros frescos que incluyen los dos aditivos varía en consonancia con las densidades. De esta forma los morteros con densidades similares al mortero que solo incluye aireante presentan contenidos de aire similares a este, mientras que los morteros con densidades mucho menores presentan contenidos de aire sensiblemente más altos que el mortero con aireante que se está tomando como referencia (Figura 7.20). Un mayor contenido en aire, al igual que una menor densidad, conlleva una mejora sustancial en la movilidad del material facilitando, en gran medida, su manejo y puesta en obra, pero también implica importantes disminuciones de las resistencias mecánicas, como se puede comprobar en el gráfico de la Figura 7.16. Se requiere, pues, un compromiso en las dosificaciones, de tal manera que la mejora de la trabajabilidad del material no penalice excesivamente las resistencias mecánicas.

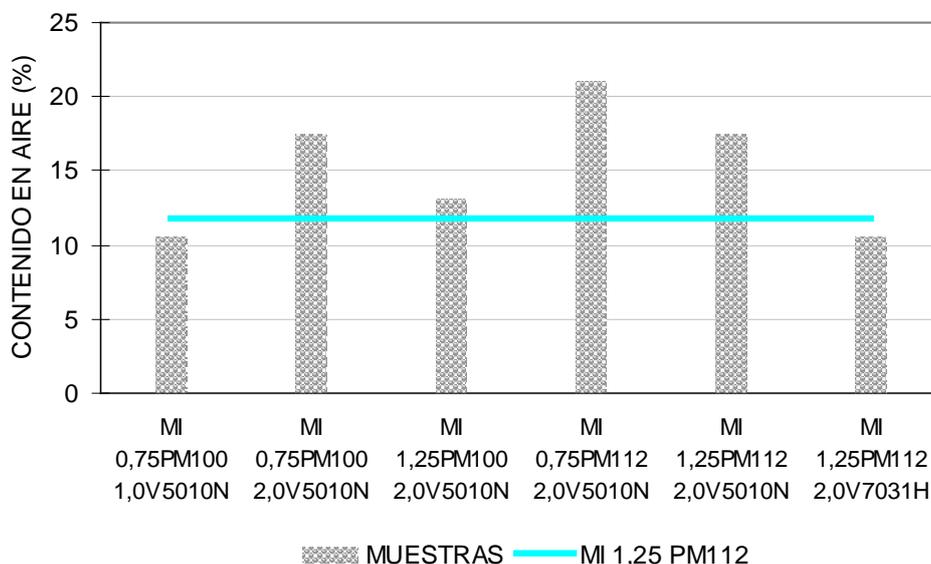


Figura 7.20. Gráfico de contenido en aire del mortero fresco en morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y polímero dispersable, en comparación con MI 1,25PM112

o Como se observa en el gráfico de la Figura 7.21, la **retención de agua** mejora en prácticamente todas las dosificaciones con respecto al mortero que solo incluye aireante, siendo la más alta la del mortero con polímero VINNAPAS 7031H, con propiedades de hidrofugante.

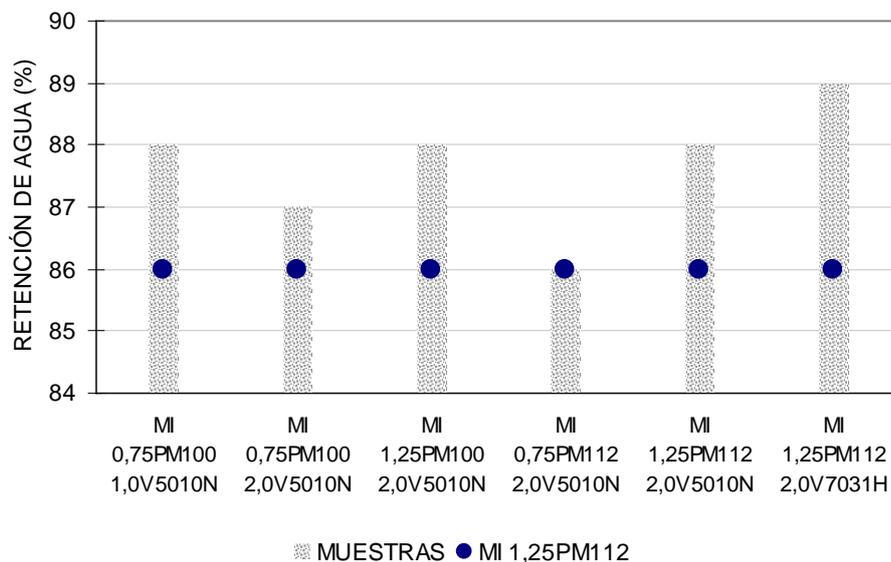


Figura 7.21. Gráfico de retención de agua del mortero fresco en morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y polímero dispersable, en comparación con MI 1,25PM112

### 7.3.1.3. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 4

Seguidamente se presentan los resultados de los ensayos realizados a los morteros fabricados con PIZ 4 y la combinación de aditivos, en estado fresco (Figura 7.22) y en estado endurecido (Figura 7.23).

MORTERO	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO (mm)
MIV 1,25PM100 2,0V5010N	1,18	180
MIV 1,25PM100 2,0V7031H	1,23	185
MIV 0,75PM112 2,0V5010N	1,13	182
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	1,15	176
MIV 1,25PM112 2,0V7031H	1,14	175

MORTERO	CONTENIDO AIRE (%)	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)
MIV 1,25PM100 2,0V5010N	11,5	2000	84
MIV 1,25PM100 2,0V7031H	7,4	2090	88
MIV 0,75PM112 2,0V5010N	18,0	1860	85
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	14,0	1950	85
MIV 1,25PM112 2,0V7031H	6,6	2130	88

Figura 7.22. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco en dosificaciones con PIZ 4 que incluyen aireante y polímero dispersable

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )
MIV 1,25PM100 2,0V5010N	2,4	7,6
MIV 1,25PM100 2,0V7031H	2,1	8,1
MIV 0,75PM112 2,0V5010N	2,5	7,1
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	2,6	7,6
MIV 1,25PM112 2,0V7031H	2,8	8,9

MORTERO	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A LA ADHESIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
MIV 1,25PM100 2,0V5010N	1890	0,37	0,42 (24) <sup>1</sup>
MIV 1,25PM100 2,0V7031H	1890	0,35	0,24 (13)
MIV 0,75PM112 2,0V5010N	1850	0,39	0,40 (27)
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	1880	0,38	0,35 (23)
MIV 1,25PM112 2,0V7031H	1950	0,45	0,27 (15)

Penetración del agua en la probeta en mm.

Figura 7.23. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido en dosificaciones con PIZ 4 que incluyen aireante y polímero dispersable

○ Como ocurre con los morteros con PIZ 1, las **resistencias mecánicas**, así como la resistencia a la adhesión, disminuyen cuando se incluyen los dos aditivos, en comparación con las resistencias mostradas por el mortero con aditivo aireante Premorter Mix 112 al 1,25% en peso de cemento, que se toma como referencia por su buen comportamiento.

En el gráfico de la Figura 7.24 se observa que las resistencias a compresión a 28 días se encuentran en valores entorno a 7,5 MPa, valor establecido como mínimo en cuanto a la resistencia a compresión del mortero en este trabajo. Estos valores son sensiblemente inferiores al alcanzado por la dosificación que incluye solo aireante y que alcanza los 9,0 MPa, representado por la línea roja horizontal en el gráfico. Cabe mencionar como excepción el comportamiento de la dosificación MIV 1,25PM112/2,0V7031H que contiene

el aireante PM112 y el polímero VINNAPAS 7031H, que alcanza resistencias a compresión muy similares a las del mortero tomado como referencia.

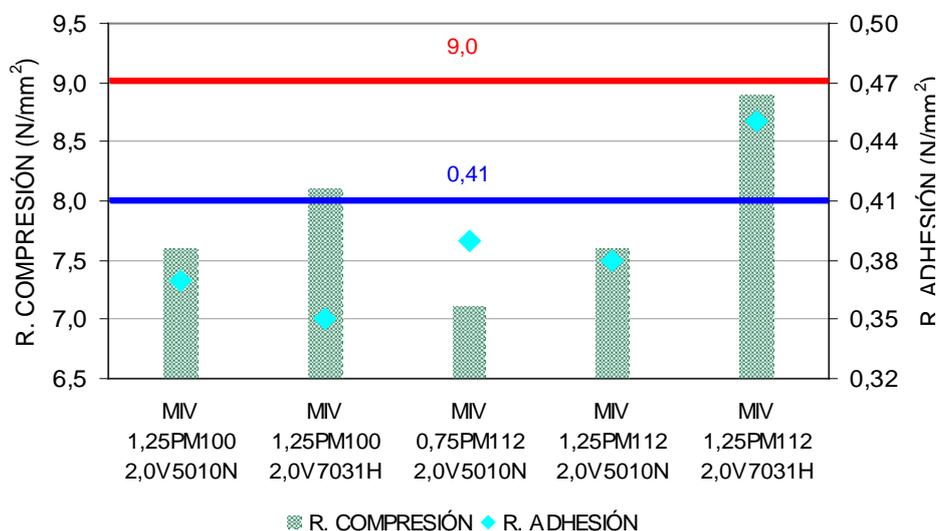


Figura 7.24. Gráfico de resistencia a compresión y resistencia a la adhesión de los morteros con PIZ 4 que incluyen aireante y polímero dispersable en comparación con MIV 1,25PM112

En el caso de la resistencia a la adhesión, esta también disminuye en todos los morteros excepto, de nuevo, en la dosificación MIV 1,25PM112/2,0V7031H, cuyo valor de adhesión es incluso mayor que los 4,1 MPa que alcanza el mortero con aireante PM112 (línea horizontal azul en el gráfico).

En ambos casos, las disminuciones observadas en las resistencias son menores en los morteros realizados con PIZ 4 que en aquellos realizados con PIZ 1.

- o La **absorción de agua por capilaridad** disminuye en los morteros que contienen el polímero con propiedades hidrófugas mientras que en los demás casos los valores de los coeficientes de absorción son mayores a los del mortero que solo incluye aireante. La penetración del agua en las probetas en los distintos tipos de mortero mantiene correspondencia con los coeficientes de absorción. Ambos valores son, en los morteros realizados con PIZ 4, sensiblemente superiores a los observados en los morteros con PIZ 1, cuando éstos incluyen la combinación de aditivos.

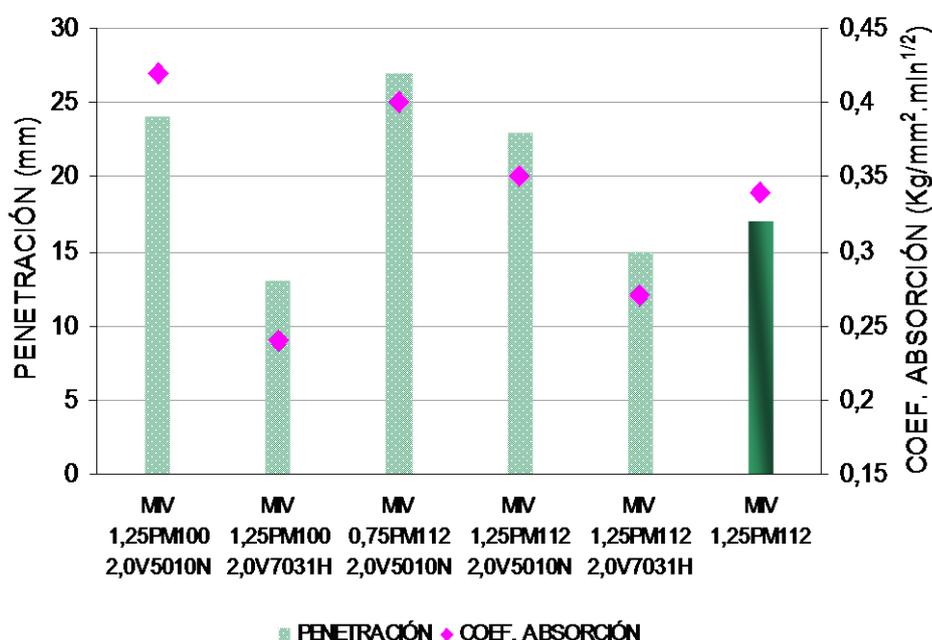


Figura 7.25. Gráfico de penetración de agua por capilaridad y coeficiente de absorción por capilaridad en morteros con PIZ 4 que incluyen aireante y polímero dispersable en comparación con MIV 1,25PM112.

o La **densidad** de los morteros en estado fresco aumenta cuando se introduce el polímero dispersable con propiedades hidrofugantes en morteros que incluyen aireantes. Este aumento en la densidad conlleva una importante disminución en el contenido de aire en estos morteros. Estos dos efectos provocan que los morteros con estas dosificaciones se vuelvan muy pesados y difíciles de mover y, por tanto, menos trabajables que el mortero MIV 1,25PM112, que solo contiene el aireante.

El comportamiento de los morteros que incluyen el polímero VINNAPAS 5010N es el contrario al anterior. Las densidades de estos morteros son menores que las del mortero que se pretende mejorar, mientras que el contenido en aire es mayor (o igual) al de éste. Esto provoca que la movilidad de estos morteros en su puesta en obra se vea sensiblemente mejorada, en perjuicio de sus resistencias mecánicas, como se ha comentado anteriormente y se puede apreciar en el gráfico de la Figura 7.24.

El gráfico que se presenta a continuación, Figura 7.26, ilustra el comportamiento de los morteros fabricados con PIZ 4 que incluyen dos aditivos frente al mortero denominado MIV 1,25PM112, en cuanto a la densidad y el contenido de aire. Las columnas en verde representan las densidades mientras que los puntos naranjas representan los contenidos en aire. La línea verde oliva se corresponde con la densidad del mortero que solo contiene aireante y la línea de puntos, de color anaranjado claro, se

corresponde con el contenido de aire de dicho mortero. Los valores de estas propiedades se incluyen numéricamente al lado de las líneas.

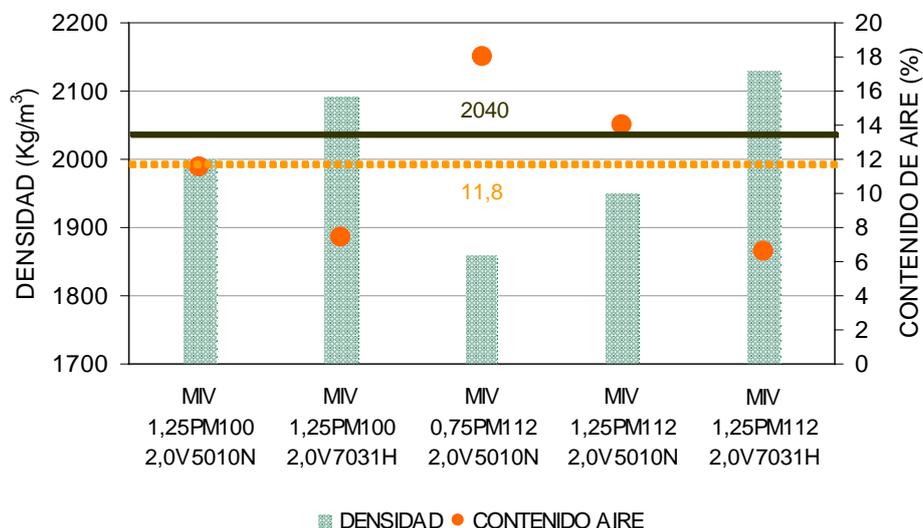


Figura 7.26. Gráfico de densidad y contenido de aire de los morteros frescos con PIZ 4 que incluyen aireante y polímero dispersable en comparación con MIV 1,25PM112

o El gráfico de la Figura 7.27 muestra la comparativa entre los valores de **retención de agua** de los morteros que incluyen aireante y polímero frente a la dosificación con el aireante PM112. En el caso del polímero dispersable con actividad hidrófuga la retención de agua aumenta de forma importante mientras que el otro polímero mejora solo ligeramente la retención frente al mortero tomado como referencia. En todos los casos la inclusión de polímero mantiene o mejora la capacidad de retener el agua de los morteros frente al que solo incluye el aireante.

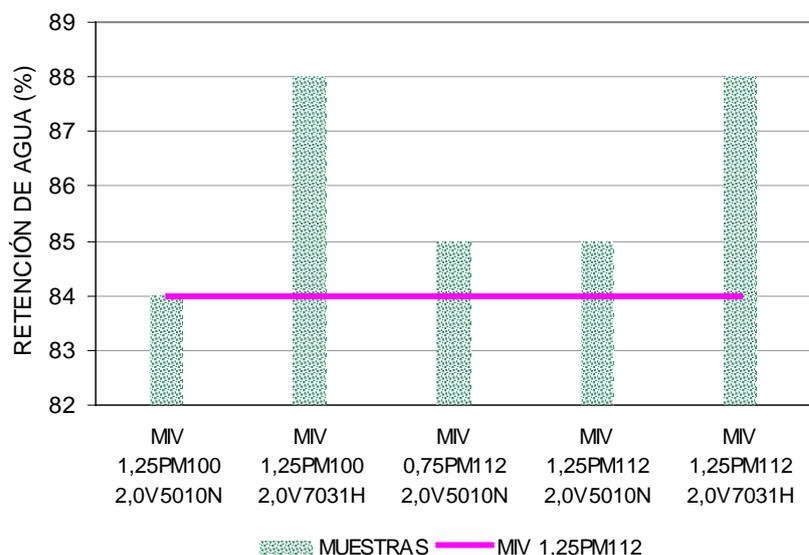


Figura 7.27. Gráfico de retención de agua del mortero fresco en morteros con PIZ 4 que incluyen aireante y polímero dispersable, en comparación con MIV 1,25PM112

### 7.3.2. Combinaciones de aireantes y retenedor de agua

Otro de los aditivos probados en los morteros de pizarra es el Cimsil C-22, cuyas características se incluyen en el capítulo 4. Este es un aditivo de base silíceo a la que se fijan componentes orgánicos. La combinación de ambos genera una red tridimensional en el mortero que, en principio, mejora la retención de agua del mortero fresco así como la adherencia de este, debido a los microanclajes de carácter físico y químico que se favorecen entre el mortero y el soporte.

#### 7.3.2.1. Dosificaciones

Se han estudiado morteros que incluyen el aireante Premorter Mix 112 y el retenedor de agua, en distintos porcentajes sobre el peso de cemento que constituye el mortero. En el cuadro de la Figura 7.28 se describen las dosificaciones probadas.

MORTERO	ARENA	ADITIVO	CANTIDAD (%)	ADITIVO	CANTIDAD (%)
MI 0,75PM112 0,5C-22	PIZARRA 1	PREMORTER MIX 112	0,75	CIMSIL C-22	0,5
MI 1,25PM112 0,5C-22			1,25	CIMSIL C-22	0,5
MI 1,25PM112 1,0C-22			1,25	CIMSIL C-22	1,0
MIV 0,75PM112 0,5C-22	PIZARRA 4	PREMORTER MIX 112	0,75	CIMSIL C-22	0,5
MIV 1,25PM112 0,5C-22			1,25	CIMSIL C-22	0,5

Figura 7.28. Dosificaciones de mortero con aditivo aireante y retenedor de agua

### 7.3.2.2. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 1

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el estudio de las dosificaciones que incluyen retenedor de agua. Para su correcta comprensión se presentan por separado los datos de los morteros en estado fresco y endurecido.

MORTERO	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO (mm)
MI 0,75PM112 0,5C-22	1,20	180
MI 1,25PM112 0,5C-22	1,16	180
MI 1,25PM112 1,0C-22	1,19	172

MORTERO	CONTENIDO AIRE (%)	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)
MI 0,75PM112 0,5C-22	13,0	1980	90
MI 1,25PM112 0,5C-22	12,0	2014	93
MI 1,25PM112 1,0C-22	13,4	1980	94

Figura 7.29. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco en dosificaciones con PIZ 1 que incluyen aireante y retenedor de agua

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
MI 0,75PM112 0,5C-22	1,5	5,7	1820	0,56 (36) <sup>1</sup>
MI 1,25PM112 0,5C-22	2,3	6,6	1850	0,42 (28)
MI 1,25PM112 1,0C-22	1,9	6,3	1840	0,49 (28)

<sup>1</sup> Penetración del agua en la probeta en mm.

Figura 7.30. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido en dosificaciones con PIZ 1 que incluyen aireante y retenedor de agua

En este caso el aditivo consigue mejorar la característica principal para la que se recomienda su uso y la retención de agua de los morteros aumenta sensiblemente. Pero la inclusión del retenedor implica una serie de efectos secundarios negativos para estos materiales.

El principal efecto que lleva consigo la incorporación de este aditivo es que para obtener morteros con consistencia normal ( $175 \pm 10$  mm) se requiere un considerable aumento del agua de amasado, ya que parte de esta queda atrapada por el retenedor en el momento del amasado.

Así, con el incremento de agua correspondiente, los morteros realizados con PIZ 1 alcanzan densidades en fresco correctas, los contenidos de aire son altos y la retención de agua mejora en comparación con los morteros que incluyen únicamente aireante. Los morteros en fresco se mueven con facilidad y mejora su manejabilidad.

Por el contrario, el aumento de la relación agua/cemento conlleva una disminución de resistencias mecánicas muy importante en los morteros endurecidos. Estos valores quedan muy por debajo del valor establecido en esta Tesis como valor mínimo a alcanzar, representado por la línea azul en el gráfico de la Figura 7.31.

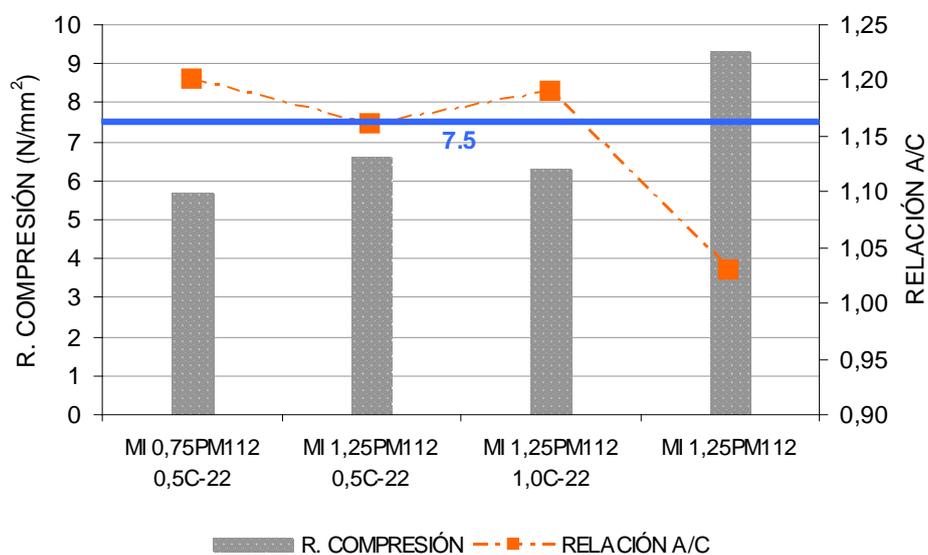
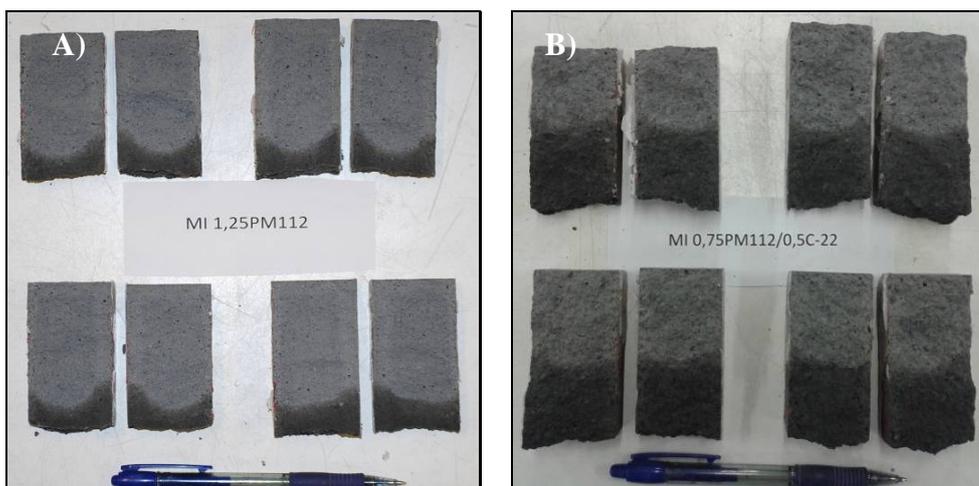


Figura 7.31. Gráfico de resistencias a compresión y relaciones A/C de morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y retenedor de agua, en comparación con MI 1,25PM112

Otro efecto secundario negativo es el aumento de la absorción de agua por capilaridad debido a la presencia del retenedor, que contiene una base silíceas derivada de la sepiolita, con alta avidez por el agua. Así, los coeficientes de absorción son mucho más altos que el que presenta el mortero a mejorar, que solo contiene el aireante. En las imágenes de la Figura 7.32 se observa de forma directa la diferencia en la profundidad de penetración del agua en las probetas que contienen el retenedor en comparación con las que no incluyen.



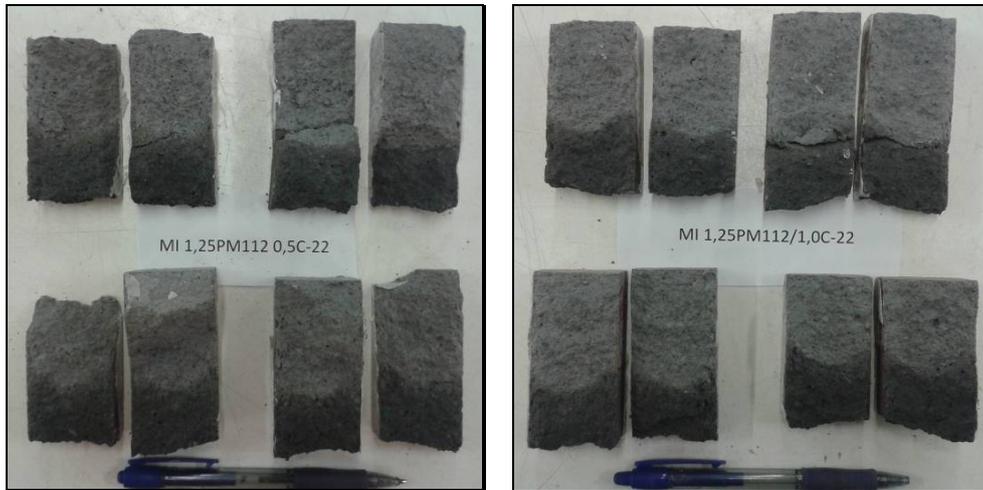


Figura 7.32. Penetración del agua en probetas sometidas al ensayo de absorción de agua por capilaridad en las dosificaciones A) MI 1,25PM112; B) MI 0,75PM112/0,5C-22; C) MI 1,25PM112/0,5C-22 y D) MI 1,25PM112/1,0C-22

### 7.3.2.3. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 4

MORTERO	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO (mm)
MIV 0,75PM112 0,5C-22	1,34	180
MIV 1,25PM112 0,5C-22	1,33	179

MORTERO	CONTENIDO AIRE (%)	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)
MIV 0,75PM112 0,5C-22	5,8	2090	90
MIV 1,25PM112 0,5C-22	6,0	2080	91

Figura 7.33. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco en dosificaciones con PIZ 4 que incluyen aireante y retenedor de agua.

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
MIV 0,75PM112 0,5C-22	1,5	5,5	1860	0,73 (41) <sup>1</sup>
MIV 1,25PM112 0,5C-22	1,5	6,3	1860	0,67 (37)

<sup>1</sup> Penetración del agua en la probeta en mm.

Figura 7.34. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido en dosificaciones con PIZ 4 que incluyen aireante y retenedor de agua

Lo dicho en el punto anterior con respecto al mortero con PIZ 1 es también aplicable a los morteros con PIZ 4. Estos requieren un aumento en el agua de amasado para alcanzar consistencias adecuadas, aumento mayor que en el caso de los morteros de PIZ 1, lo que provoca grandes disminuciones en las resistencias a compresión. La retención de agua de los morteros frescos aumenta pero también lo hace, y mucho, la absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos (Figura 7.35).

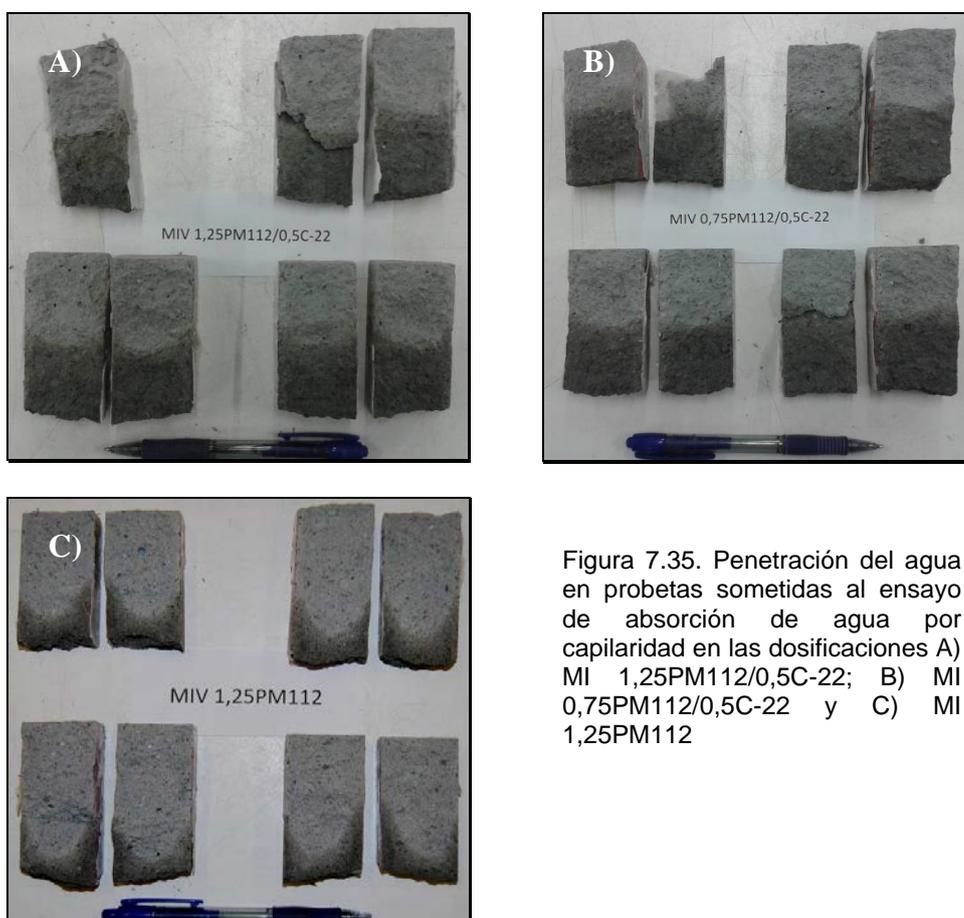


Figura 7.35. Penetración del agua en probetas sometidas al ensayo de absorción de agua por capilaridad en las dosificaciones A) MI 1,25PM112/0,5C-22; B) MI 0,75PM112/0,5C-22 y C) MI 1,25PM112

Pero la inclusión del retenedor en estos morteros produce unos efectos distintos a los que se dan en los morteros de PIZ 1 en lo que respecta a la densidad y el contenido de aire en los morteros frescos. En este caso las densidades aumentan, en comparación con la dosificación que solo contiene aireante Premorter Mix 112, y el contenido en aire disminuye de forma importante, como se ve en el gráfico de la Figura 7.36. La consecuencia es que estos morteros se vuelven bastante difíciles de manipular a las consistencias normales y requieren grandes esfuerzos a la hora de trabajar con ellos.

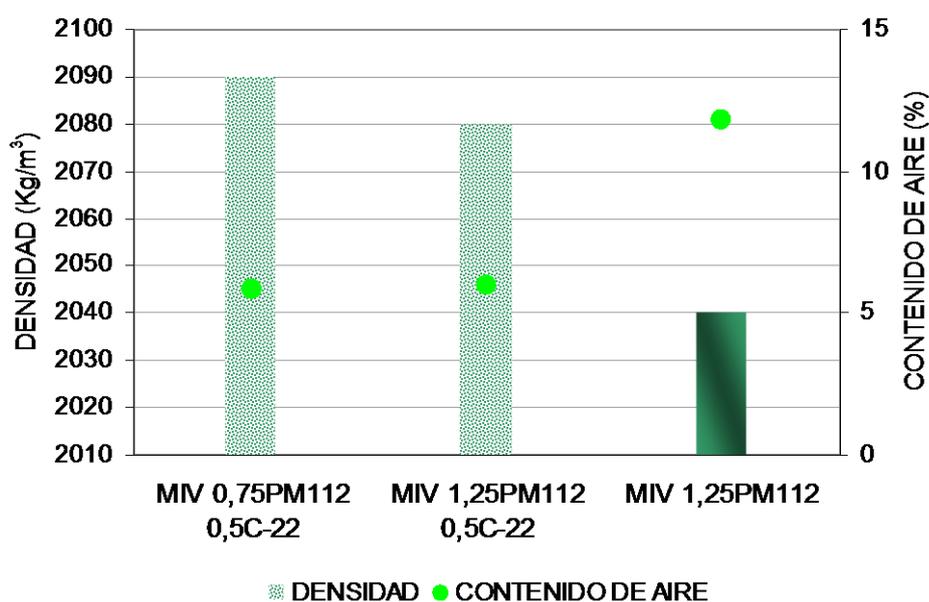


Figura 7.36. Gráfico de densidad y contenido de aire de los morteros frescos con PIZ 4 que incluyen aireante y retenedor de agua en comparación con MIV 1,25PM112

### 7.3.3. Combinaciones de aireantes y cales

Por último, se han introducido cales en las formulaciones de morteros con aireante. En este caso las cales se han incluido con el propósito de mejorar la movilidad del material en estado fresco, de manera que resulte fácil de trabajar para el profesional que lo pone en la obra. La cal mejora la plasticidad de los morteros, facilitando que los áridos en la masa se desplacen con menor rozamiento entre sí, con lo que se requieren menores esfuerzos para mover, colocar y dar forma al mortero en la unidad de obra que se esté ejecutando.

Las cales que se han probado en esta tesis son la cal aérea CL90-S de la casa Calcasa, del grupo Calcinor, y la cal hidráulica natural NHL-5 de la marca FYM, ambas debidamente caracterizadas en el capítulo 4.

En este trabajo las cales se tratan como aditivos ya que su inclusión se debe al intento de mejora de una característica específica de los morteros en

cuestión. Sin embargo las cantidades introducidas son bastante mayores a las que se introducen de los aditivos propiamente dichos, y la demanda de agua de amasado aumenta de manera importante, como corresponde a la naturaleza de conglomerantes que estas cales tienen, así como a la finura de sus partículas.

### 7.3.3.1. Dosificaciones

A continuación se incluye un cuadro de las dosificaciones con cal que se han probado. El único aireante que se ha incluido es el Premorter Mix 112, ya que ha demostrado ser el que mejores resultados ha reportado (Figura 7.37).

MORTERO	ARENA	ADITIVO	CANTIDAD (%)	ADITIVO	CANTIDAD (%)
MI 1,25PM112 25CL90-S	PIZARRA 1	PREMORTER MIX 112	1,25	CL90-S	25
MI 1,25PM112 15CL90-S			1,25	CL90-S	15
MI 0,75PM112 15NHL-5			0,75	NHL-5	15
MI 1,25PM112 15NHL-5			1,25	NHL-5	15
MIV 1,25PM112 15CL90-S	PIZARRA 4	PREMORTER MIX 112	1,25	CL90-S	15
MIV 2,0PM112 15CL90-S			2,0	CL90-S	15
MIV 0,75PM112 15NHL-5			0,75	NHL-5	15
MIV 1,25PM112 15NHL-5			1,25	NHL-5	15

Figura 7.37. Dosificaciones de mortero con aditivo aireante y cal.

### 7.3.3.2. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 1

Los datos obtenidos de los morteros con aireante y cal se presentan en las tablas de las Figuras 7.38 y 7.39.

MORTERO	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO (mm)
MI 1,25PM112 25CL90S	1,13	169
MI 1,25PM112 15CL90S	1,08	183
MI 0,75PM112 15NHL5	1,12	170
MI 1,25PM112 15NHL5	1,05	183

MORTERO	CONTENIDO AIRE (%)	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)
MI 1,25PM112 25CL90S	7,8	2110	90
MI 1,25PM112 15CL90S	10,5	2100	90
MI 0,75PM112 15NHL5	9,8	2090	87
MI 1,25PM112 15NHL5	12,0	2050	88

Figura 7.38. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco en dosificaciones con PIZ 1 que incluyen aireante y cal

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
MI 1,25PM112 25CL90S	3,0	9,8	1950	0,35 (21)
MI 1,25PM112 15CL90S	2,5	9,4	1930	0,19 (16)
MI 0,75PM112 15NHL5	2,6	9,2	1930	0,39 (26)
MI 1,25PM112 15NHL5	3,5	11,3	1910	0,23 (19)

Figura 7.39. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido en dosificaciones con PIZ 1 que incluyen aireante y cal

La inclusión de cales en los morteros provoca la mejora de algunas características de estos mientras que empeora otras. No obstante, se puede decir que estas variaciones no son muy acusadas en ningún caso. A continuación se comentan los aspectos más destacables.

- Las **resistencias mecánicas** a 28 días se mantienen o aumentan, a pesar del incremento en la cantidad de agua de amasado que se produce en estas dosificaciones. Este comportamiento se puede considerar normal, ya que se está aumentando la cantidad de conglomerante total en el mortero, lo que requiere mayor cantidad de agua pero mejora el comportamiento en cuanto a las resistencias (Figura 7.40).

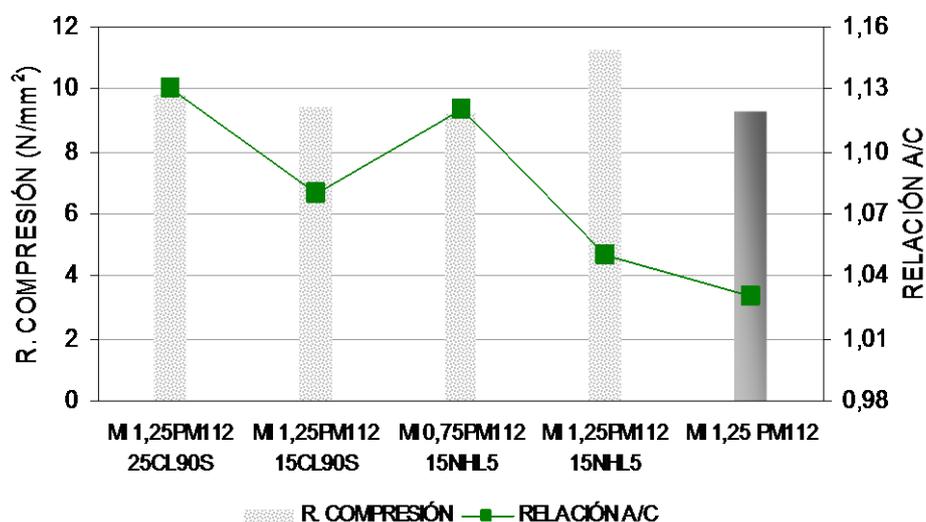


Figura 7.40. Gráfico de resistencias a compresión y relaciones A/C de morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y cal, en comparación con MI 1,25PM112

- La **retención de agua** en los morteros frescos aumenta en todos los casos. Como se observa en el gráfico de la Figura 7.41, este aumento es más notable en los morteros que incluyen cal aérea que en aquellos que contienen cal hidráulica.

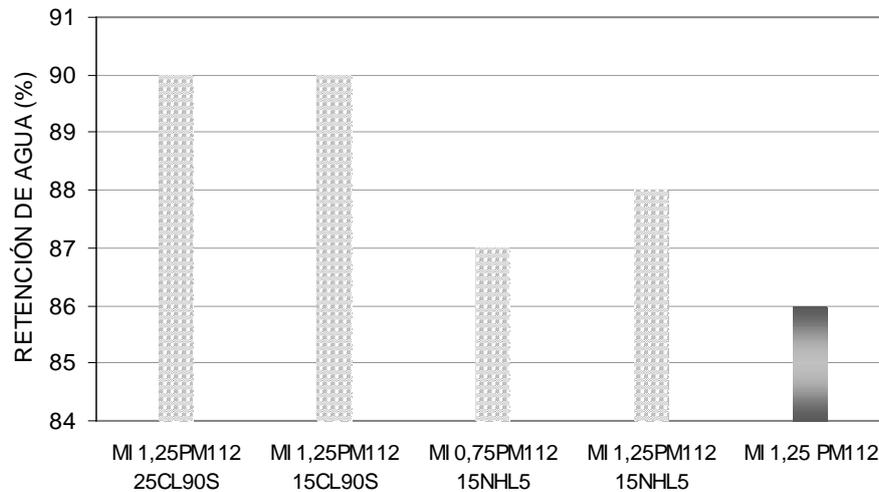


Figura 7.41. Gráfico de retención de agua del mortero fresco en morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y cal, en comparación con MI 1,25PM112

o En el gráfico de la Figura 7.42 se representan los resultados de las **densidades** de los morteros frescos, así como de los contenidos en aire, en comparación con el mortero que solo contiene el aditivo plastificante-aireante. Como se puede apreciar las densidades aumentan ligeramente, excepto en la dosificación con aireante y cal hidráulica, al 1,25% y 15% en peso de cemento respectivamente, en la que la densidad es ligeramente menor. En cuanto al **contenido de aire**, este disminuye ligeramente al incluir la cal en las dosificaciones, siendo esta disminución más acusada en la dosificación que incluye más porcentaje de cal aérea. Esto parece indicar que la presencia de cal no influye en exceso en el desarrollo de las microburbujas de aireante en la masa. En todo caso el efecto de la cal aérea sería más negativo que el de la cal hidráulica.

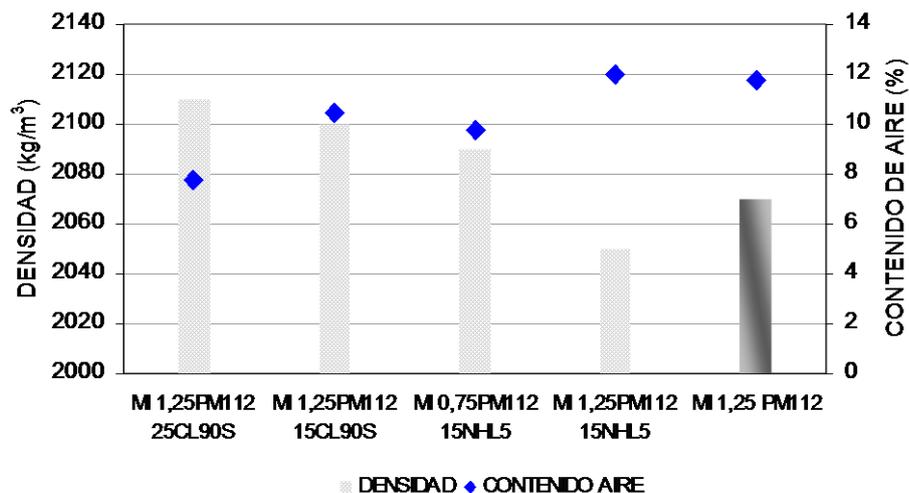


Figura 7.42. Gráfico de densidad y contenido de aire de los morteros frescos con PIZ 1 que incluyen aireante y cal, en comparación con MI 1,25PM112.

o El resultado más negativo en cuanto a las características de los morteros con cal se da en el caso de la **absorción por capilaridad**, ya que ninguna de estas formulaciones mejora al mortero que no contiene cal (Figura 7.43).

Los coeficientes de absorción de agua son iguales o mayores que el del mortero que se pretende mejorar y la altura media de penetración del agua en las probetas es mayor en todos los casos. Este comportamiento se aprecia muy bien en las fotografías de la Figura 7.44.

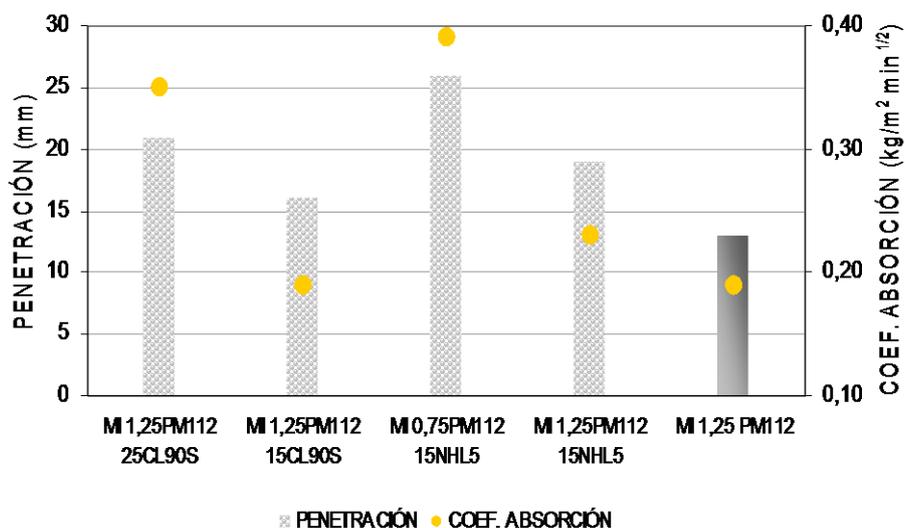
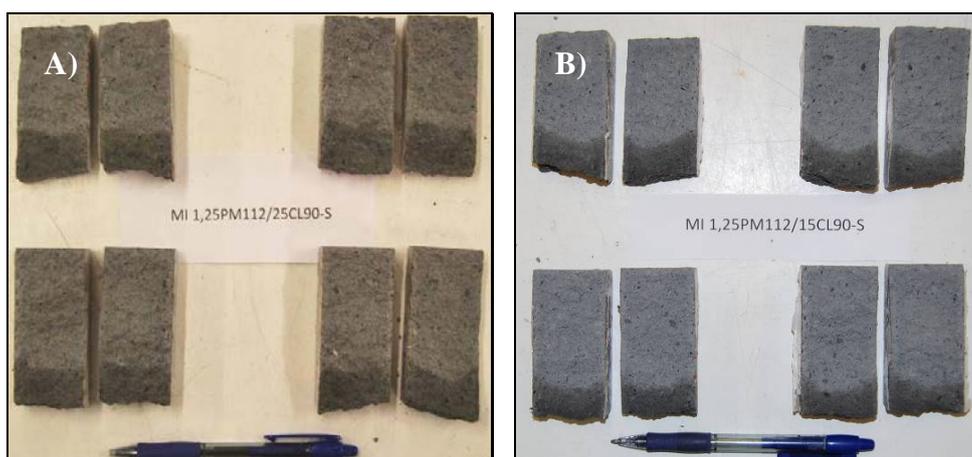


Figura 7.43. Gráfico de penetración de agua por capilaridad y coeficiente de absorción por capilaridad en morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y cal, en comparación con MI 1,25PM112



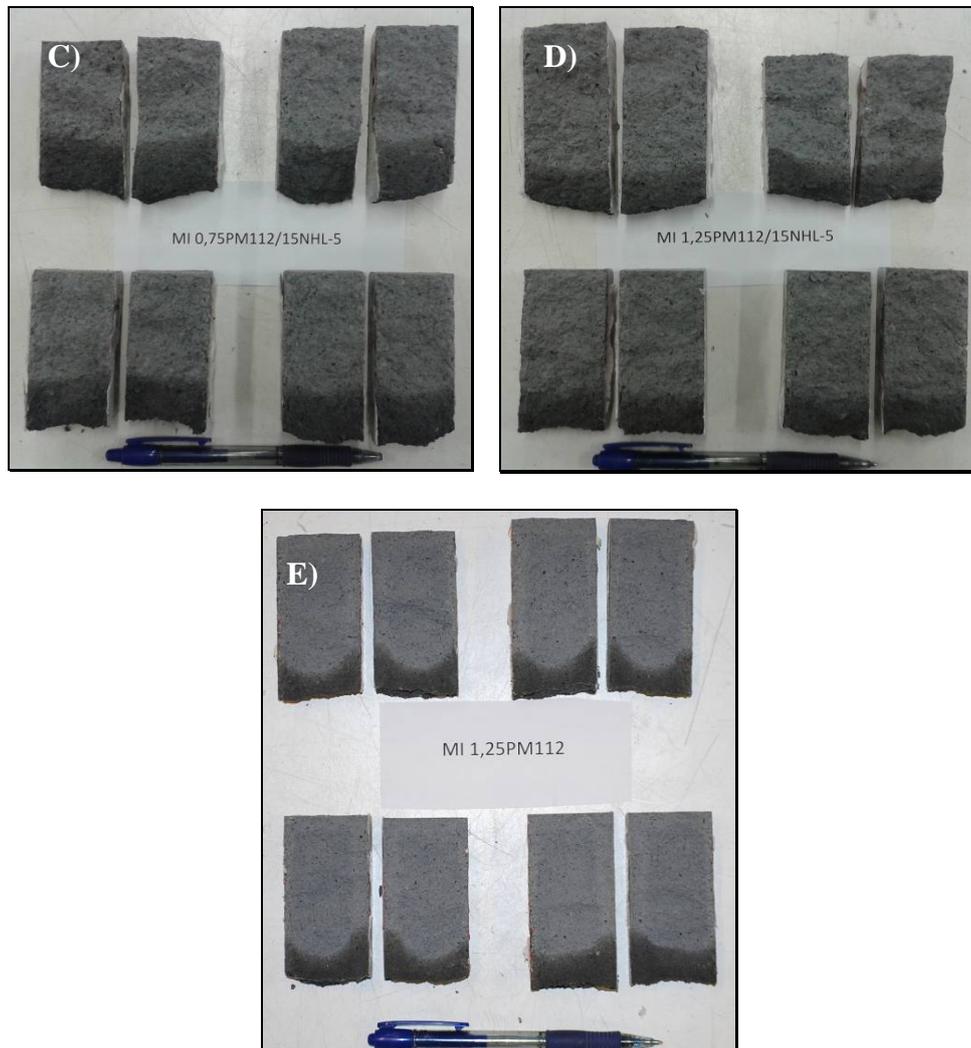


Figura 7.44. Penetración del agua en probetas sometidas al ensayo de absorción de agua por capilaridad en las dosificaciones A) MI 1,25PM112/25CL90-S; B) MI 1,25PM112/15CL90-S; C) MI 0,75PM112/15NHL-5; D) MI 1,25PM112/15NHL-5 y E) MI 1,25PM112

Cabe destacar que la mayor absorción corresponde al mortero que incluye menor porcentaje de aireante, lo que hace pensar que, como en otros casos vistos anteriormente, es la concentración de este aditivo lo que determina en mayor medida el mejor o peor comportamiento del mortero en cuanto a esta característica.

○ A pesar de las similitudes entre los resultados de los ensayos de los morteros que llevan cal y el mortero que sólo lleva aireante, a la hora de trabajar con estos materiales se advierte una gran mejoría en cuanto a su **movilidad** y a la facilidad con que se manejan. Este comportamiento se

aprecia especialmente en las dosificaciones MI 1,25PM112/15CL90-S y MI 1,25PM112/15NHL-5.

En un intento de expresar en forma de datos esta mejoría en los morteros con cal, se recurre al ensayo del maneabilímetro, según la norma francesa NF P18-455:2003 (ya que no hay norma española ni europea adaptada). La metodología del ensayo se ha desarrollado debidamente en el Capítulo 3 y el fundamento es la medición del tiempo que tarda el mortero en fluir por un espacio establecido.

El ensayo se ha realizado con los dos morteros mencionados arriba y con el mortero de referencia a mejorar, el MI 1,25PM112. Los tres morteros se han amasado para alcanzar las consistencias normales, muy próximas en todos ellos. Los resultados del ensayo se muestran en el gráfico de la Figura 7.45.

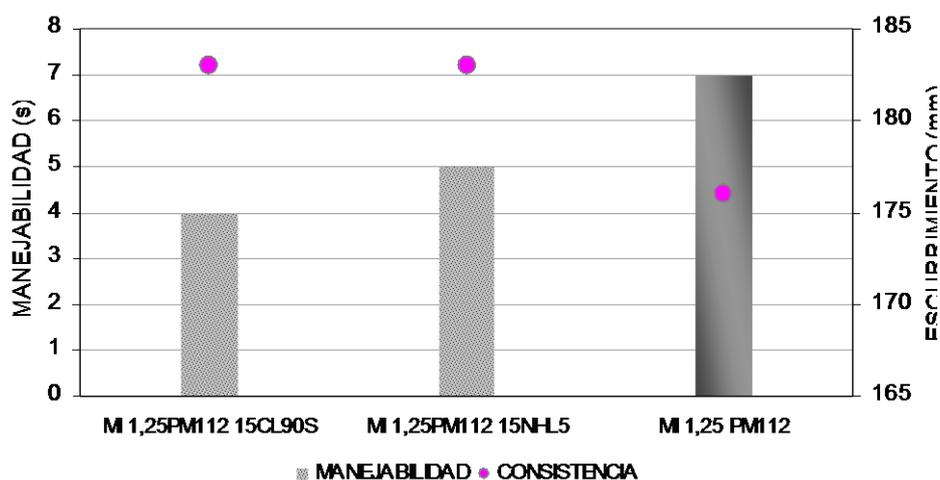


Figura 7.45. Gráfico de maneabilidad y escurrimiento de los morteros con PIZ 1 que incluyen plastificante-aireante y cal, en comparación con MI 1,25PM112

Del resultado del ensayo de maneabilidad se desprende que las cales mejoran la movilidad de los morteros pero, al mismo tiempo, producen un aumento de la cohesión de la masa, consiguiendo que los escurrimientos sean los adecuados. Se puede decir que se llega a un compromiso entre movilidad y cohesión que mejora muy sensiblemente el comportamiento de estos morteros.

### 7.3.3.3. Resultados obtenidos para morteros con PIZ 4

Los datos de los morteros con PIZ 4 se incluyen en las Figuras 7.46 y 7.47.

MORTERO	RELACIÓN A/C	ESCURRIMIENTO (mm)
MIV 1,25PM112 15CL90S	1,20	176
MIV 2,0PM112 15CL90S	1,18	182
MIV 0,75PM112 15NHL5	1,17	174
MIV 1,25PM112 15NHL5	1,15	177

MORTERO	CONTENIDO AIRE (%)	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)
MIV 1,25PM112 15CL90S	7,4	2100	85
MIV 2,0PM112 15CL90S	7,6	2090	86
MIV 0,75PM112 15NHL5	6,4	2100	82
MIV 1,25PM112 15NHL5	6,8	2120	83

Figura 7.46. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco en dosificaciones con PIZ 4 que incluyen aireante y cal

MORTERO	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
MIV 1,25PM112 15CL90S	2,9	10,9	1890	0,26 (15)
MIV 2,0PM112 15CL90S	2,8	10,3	1910	0,24 (13)
MIV 0,75PM112 15NHL5	3,0	8,6	1900	0,44 (24)
MIV 1,25PM112 15NHL5	3,1	9,7	1860	0,32 (19)

Figura 7.47. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido en dosificaciones con PIZ 4 que incluyen aireante y cal

El comportamiento de los morteros de PIZ 4, cuando incluyen como aditivos el aireante y una cal, difiere considerablemente del de los morteros realizados con PIZ 1.

A continuación se analizan los resultados obtenidos de forma independiente.

- En lo que respecta a las **resistencias mecánicas** a los 28 días, éstas se mantienen o aumentan con relación a la del mortero MIV 1,25PM112. La inclusión de las cales conlleva, como se ha comentado anteriormente, un mayor aporte de agua de amasado para alcanzar los escurrimientos adecuados, como se refleja en la Figura 7.48.

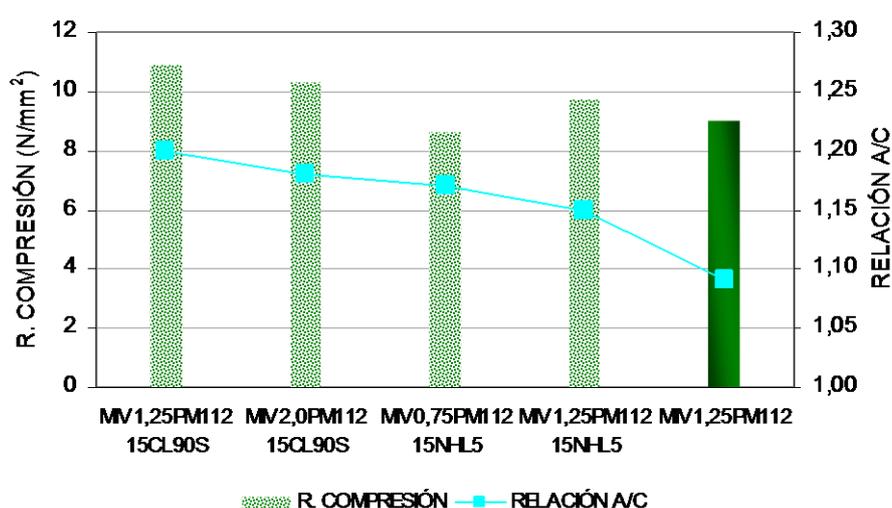


Figura 7.48. Gráfico de resistencias a compresión y relaciones A/C de morteros con PIZ 1 que incluyen aireante y cal, en comparación con MI 1,25PM112

- La **retención de agua** en el mortero fresco varía según el tipo de cal que se emplee. Se produce una mayor retención con la cal aérea, mientras que esta disminuye cuando la cal usada es la hidráulica. En este caso se debe tener en cuenta que se presentan dosificaciones con porcentajes de aireante entre 0,75 y 2,0% en peso de cemento, obteniendo las menores retenciones los morteros con porcentaje de aireante más bajo y las mayores los morteros con porcentajes más altos.

El gráfico de la Figura 7.49 muestra el comportamiento de los morteros frente a la retención de agua. Se puede resumir que cales aéreas y altos porcentajes de aireante dan retenciones altas, mientras que cales hidráulicas y bajas concentraciones de aireante dan lugar a valores bajos de retención de agua.

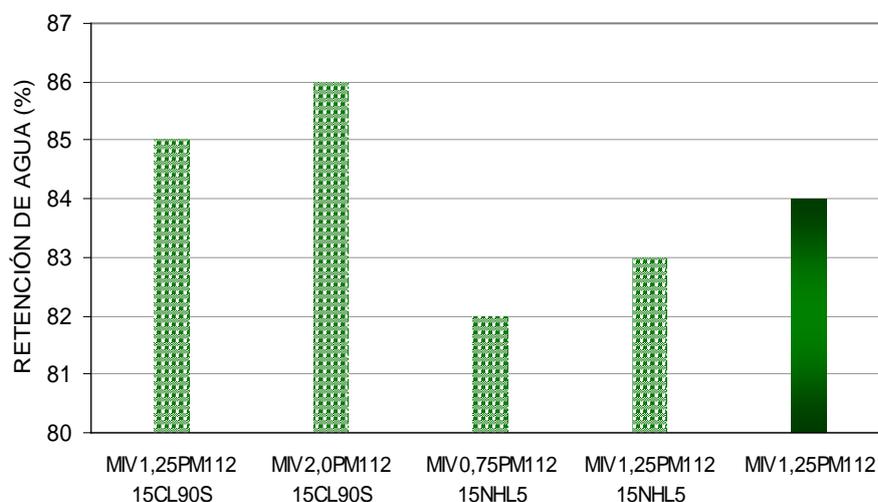


Figura 7.49. Gráfico de retención de agua del mortero fresco en morteros con PIZ 4 que incluyen aireante y cal, en comparación con MIV 1,25PM112

o La **absorción por capilaridad** en los morteros endurecidos presenta un comportamiento opuesto a la retención de agua. Los morteros con cal aérea presentan penetraciones de agua menores que los morteros con cal hidráulica y esta penetración es menor cuanto mayor es el contenido en aireante en la mezcla (Figura 7.50). Los coeficientes de absorción siguen las mismas pautas, aunque las diferencias con el mortero de referencia no son demasiado importantes.

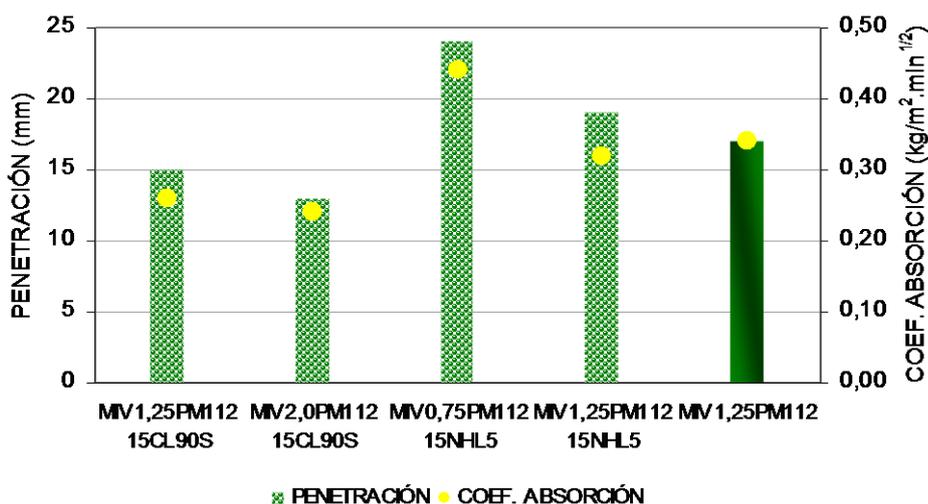


Figura 7.50. Gráfico de penetración de agua por capilaridad y coeficiente de absorción por capilaridad en morteros con PIZ 4 que incluyen aireante y cal, en comparación con MIV 1,25PM112

En la Figura 7.51 se pueden ver las imágenes de las probetas sometidas al ensayo de absorción de agua por capilaridad, con las huellas resultantes de la penetración de agua.

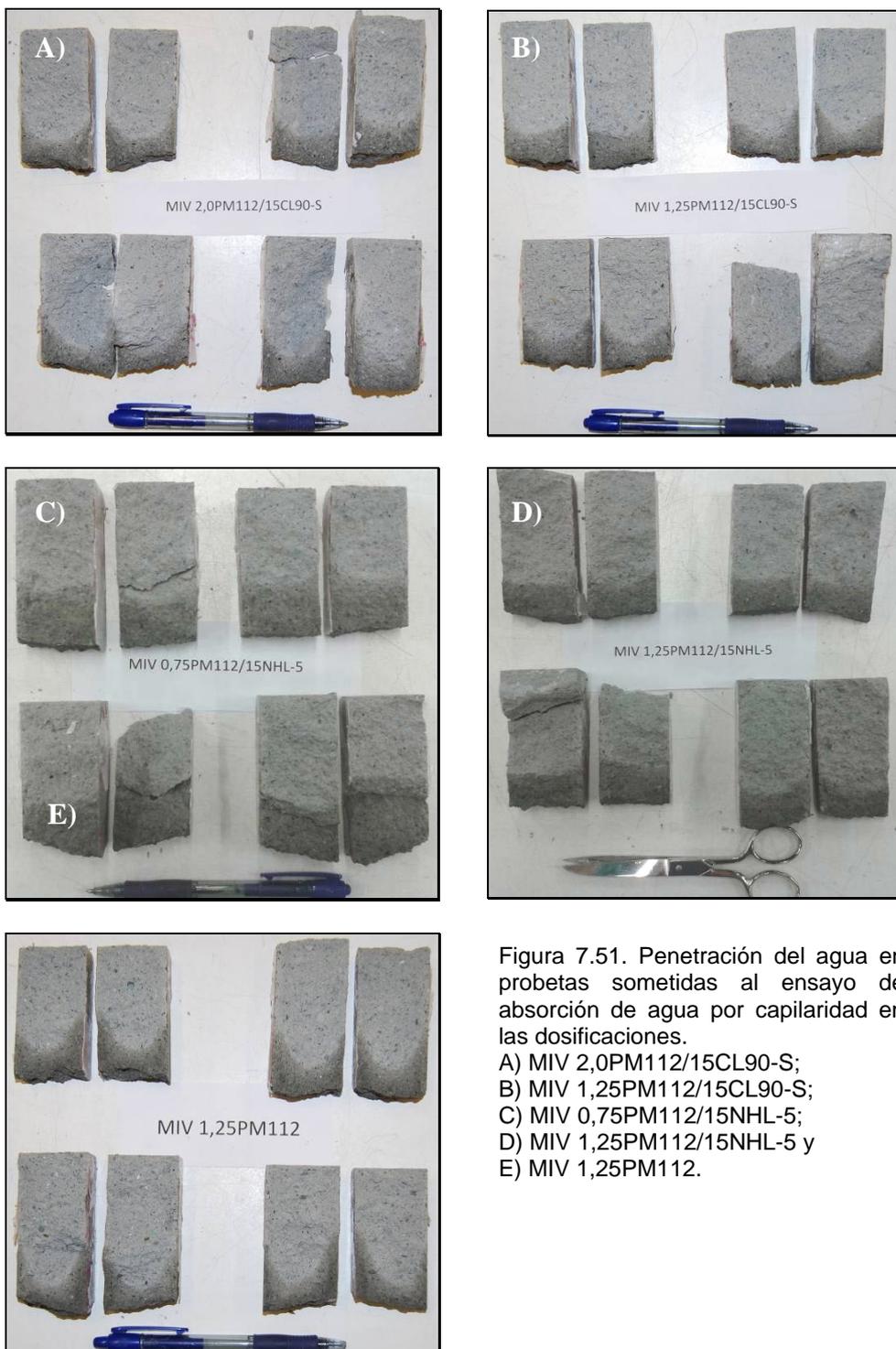


Figura 7.51. Penetración del agua en probetas sometidas al ensayo de absorción de agua por capilaridad en las dosificaciones.

- A) MIV 2,0PM112/15CL90-S;
- B) MIV 1,25PM112/15CL90-S;
- C) MIV 0,75PM112/15NHL-5;
- D) MIV 1,25PM112/15NHL-5 y
- E) MIV 1,25PM112.

○ Los resultados de las **densidades** y los **contenidos de aire** de los morteros que incluyen cal resultan bastante negativos cuando se comparan con los del mortero que solo incluye aireante. La comparativa se presenta en el gráfico de la Figura 7.52, en el que se aprecia que las densidades aumentan de forma importante y, en la misma medida, el contenido de aire de las masas frescas disminuye.

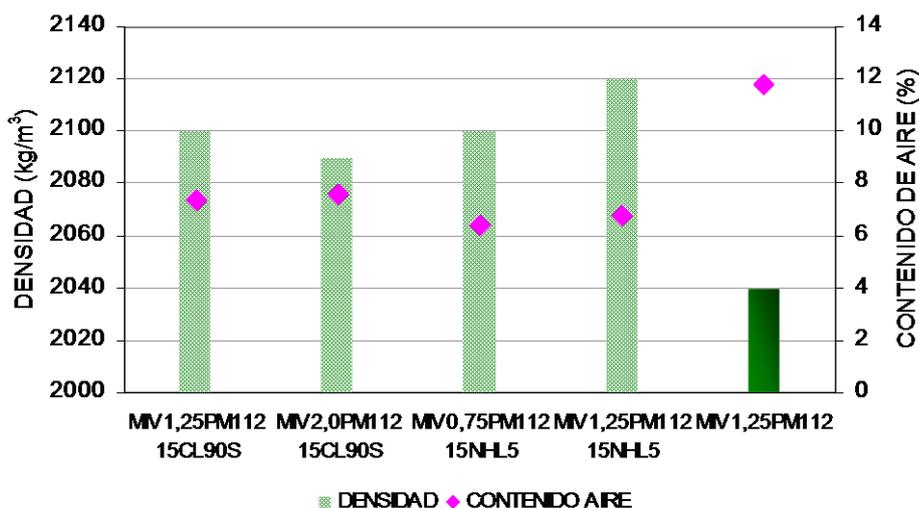


Figura 7.52. Gráfico de densidad y contenido de aire de los morteros frescos con PIZ 4 que incluyen aireante y cal, en comparación con MIV 1,25PM112

El comportamiento de estos morteros es visiblemente distinto al de los morteros con PIZ 1 que, aun no mejorando en general en estas características, presentan resultados más favorables.

○ Otra diferencia entre los morteros fabricados con las dos pizarras es que los morteros de PIZ 4 que incluyen cal no mejoran en cuanto a **movilidad**. De hecho su comportamiento empeora de forma patente y estos morteros se muestran pesados y difíciles de mover aun presentando consistencias adecuadas en la mesa de sacudidas.

Se ha estudiado la manejabilidad de algunas dosificaciones para comprobar este comportamiento y, sorprendentemente, se constata que los morteros con cal fluyen ligeramente mejor que el que no contiene cal (Figura 7.53).

En todo caso parece que el aumento de peso y la disminución de la cantidad de aire en los morteros son más determinantes que la plasticidad que aportan las cales y la movilidad de estos morteros empeora volviéndose difíciles de trabajar.

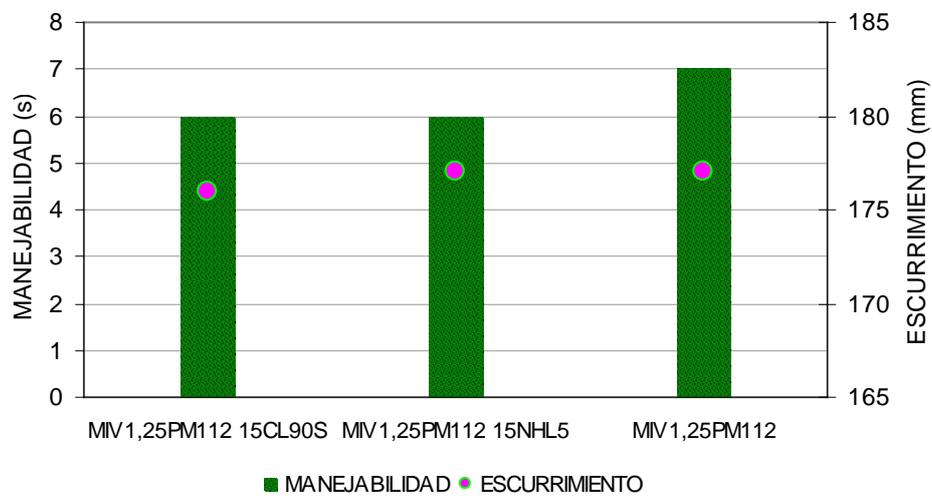


Figura 7.53. Gráfico de manejabilidad y escurrimiento de los morteros con PIZ 4 que incluyen plastificante-aireante y cal, en comparación con MIV 1,25PM112

## **Capítulo 8: Caracterización de los morteros mejorados**

---



## 8.1. Introducción

En los capítulos precedentes se ha llevado a cabo un trabajo de diseño y mejora de los morteros realizados con pizarra, que conduce al desarrollo de varias dosificaciones con características adecuadas para su fabricación, con las suficientes garantías de calidad y competitividad.

En este capítulo se incluyen las caracterizaciones de los morteros que se han seleccionado por sus excepcionales propiedades. A continuación se presentan estas dosificaciones y se justifica su selección como mortero propuesto para su fabricación:

- **MI 1,25PM112:** Este es un mortero realizado con CEM IV y PIZ 1 en relación 1:6, que incluye plastificante-aireante al 1,25% en peso de cemento como único aditivo. Su clasificación, según la norma UNE-EN 998-1, sería como un mortero de revoco y enlucido de uso corriente, GP, CS IV en cuanto a la resistencia a la compresión y W 2 en función de su absorción de agua por capilaridad. Su clasificación según la norma UNE-EN 998-2 sería como un mortero de albañilería M 5. Las características de este mortero lo hacen viable para ambos tipos de usos lo que lo hace muy polivalente para una amplia gama de unidades de obra.
- **MI 1,25PM112/2,0V7031H:** Este mortero incluye CEM IV y PIZ 1 en relación 1:6 y una mezcla de aditivos compuesta por el plastificante-aireante y el polímero dispersable al 1,25% y 2% en peso de cemento respectivamente. En cuanto a su clasificación con respecto a las normas UNE, esta sería la misma que en el caso anterior como mortero de revoco y enlucido o como mortero de albañilería pero, por su excepcionalmente baja absorción de agua por capilaridad y la pequeña penetración del agua en el interior del mortero, éste se muestra muy apropiado para usos en exterior en piezas de obra que requieran especiales propiedades de hidrofugacidad.
- **MI 1,25PM112/15CL90-S:** Mortero realizado con CEM IV y PIZ 1 en relación 1:6. Se aditiva con plastificante-aireante y cal aérea al 1,25% y 15% en peso de cemento respectivamente. A pesar de que la cal se ha incluido como aditivo, el mortero obtenido tiene dos conglomerantes diferentes, como son el cemento y la cal, y debe ser definido como un mortero de cemento y cal de revoco/enlucido de uso corriente, GP, de categorías CS IV y W 2, según la norma UNE-EN

998-1, o un mortero de albañilería M 5 según la norma UNE-EN 998-2.

La introducción de la cal aérea mejora la manejabilidad del mortero fresco y su retención de agua, aumentando de forma importante el período de trabajabilidad del mortero, lo que facilita su uso en un tiempo prolongado una vez amasado.

- **MI 1,25PM112/15NHL-5:** Este es un mortero hecho con CEM IV y PIZ 1 en relación 1:6, aditivado con plastificante-aireante al 1,25% y cal hidráulica al 15%, ambos en peso de cemento. Como el anterior, este es un mortero de cemento y cal para uso general como mortero de revoco y enlucido, GP, de categoría CS IV, en cuanto a la resistencia a compresión, y W 1 en cuanto a la absorción por capilaridad. Como mortero de albañilería se podría definir como M 10, debido al incremento en la resistencia a compresión por la inclusión de la cal hidráulica en la mezcla.

La cal hidráulica aporta similares beneficios al mortero fresco que la cal aérea y un plus a las resistencias mecánicas finales debido al componente cementicio que estas cales incluyen.

- **MIV 1,25PM112:** Este mortero está compuesto por CEM IV y PIZ 4 en relación 1:6 e incluye plastificante-aireante en un 1,25% en peso de cemento. Según la norma UNE-EN 998-1, sería un mortero de revoco y enlucido de uso corriente, GP, CS IV en cuanto a la resistencia a la compresión y W 2 en cuanto a su absorción de agua por capilaridad. En cuanto a su clasificación según la norma UNE-EN 998-2 sería un mortero de albañilería M 5.

Las características de esta dosificación posibilitan su uso como morteros de albañilería o de revoco y enlucido para diferentes unidades de obra en exteriores o interiores.

- **MIV 1,25PM112/2,0V5010N:** Mortero realizado con CEM IV y PIZ 4 en relación 1:6. Los aditivos que incluye son el plastificante-aireante y el polímero dispersable en porcentajes del 1,25% y el 2,0% en peso de cemento respectivamente. La clasificación del mortero en función de las normas UNE es la misma que el anterior.

La inclusión del polímero dispersable mejora la trabajabilidad del mortero fresco, ya que disminuye su densidad de forma importante. También la retención de agua se ve mejorada. En el otro sentido el mortero aumenta ligeramente su absorción cuando incluye el polímero

y disminuye sus resistencias mecánicas, aunque estas se mantienen en parámetros correctos.

## 8.2. Resultados de los ensayos de los morteros frescos

En la Figura 8.1 se incluyen los resultados de los ensayos realizados sobre los morteros frescos de las dosificaciones seleccionadas. Parte de estos resultados se han presentado en el capítulo 7 y se completan con los ensayos que se requieren para la adecuada caracterización de los morteros.

MORTERO	RELACIÓN A/C	CONTENIDO AIRE (%)
MI 1,25PM112	1,03	11,8
MI 1,25PM112 2,0V7031H	1,08	10,5
MI 1,25PM112 15CL90-S	1,08	10,5
MI 1,25PM112 15NHL-5	1,05	12,0
MIV 1,25PM112	1,09	11,8
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	1,15	14,0

MORTERO	DENSIDAD FRESCO (Kg/m <sup>3</sup> )	RETENCIÓN DE AGUA (%)	PERÍODO DE TRABAJABILIDAD (min)
MI 1,25PM112	2070	86	208
MI 1,25PM112 2,0V7031H	2060	89	298
MI 1,25PM112 15CL90-S	2100	90	253
MI 1,25PM112 15NHL-5	2050	88	263
MIV 1,25PM112	2040	84	190
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	1950	85	290

Figura 8.1. Resultados de los ensayos sobre mortero fresco

## 8.2.1. Análisis de los resultados de los ensayos en los morteros frescos

### 8.2.1.1. Relación agua/cemento

Si se traslada el valor de la relación agua/cemento a cantidades de agua de amasado, estas oscilan entre 14 y 16,5 litros para 100 kg de material seco en función del tipo de mortero. Estas cantidades de agua están en consonancia con las recomendadas en las fichas técnicas de los morteros de albañilería y de revoco y enlucido actuales, siendo más bajas que en un buen número de éstos. Se ha de tener en cuenta que el contenido de agua en el mortero es un factor importante a la hora de conseguir morteros durables, compactos y con una porosidad y capilaridad contenida<sup>134</sup>.

Se observa que para dosificaciones iguales la pizarra verde (PIZ 4) requiere cantidades mayores de agua de amasado que la pizarra gris (PIZ 1). Este hecho se ha repetido durante toda la investigación y puede deberse al diferente contenido en clorita que presenta cada una.

Como puede observarse en el estudio petrográfico de las pizarras, en el capítulo 4, la PIZ 1 presenta un 15% de clorita mientras que la PIZ 4 presenta un 28%, siendo el tamaño de las partículas de clorita mucho menor y estando esta más repartida en esta última pizarra. La diferencia en el contenido, tamaño y distribución de la clorita hace que los finos de una y otra pizarra se comporten de forma muy diferente en cuanto a la absorción de agua, que es sensiblemente mayor en la PIZ 4 que en la PIZ 1, 0,36% frente a 0,22% (ver capítulo 4).

Esta diferencia de comportamiento hace que haya sido más sencillo optimizar dosificaciones con características correctas en los morteros realizados con PIZ 1 que en aquellos realizados con la otra pizarra.

### 8.2.1.2. Contenido de aire

El contenido en aire ocluido en los morteros seleccionados está entre el 10% y el 14%. Estos valores son sensiblemente mayores a los de los morteros comerciales, que se encuentran entre el 8 y el 10% en su mayoría.

Los altos contenidos en aire ocluido se deben a que todas las dosificaciones incluyen el aditivo aireante Premorter Mix 112, responsable de elevar estos contenidos de aire desde los valores de entre 3% y 4% de aire ocluido que presentan los morteros de inicio, que no incluyen ningún tipo de aditivo.

---

<sup>134</sup> Neville, A.M. Properties of Concrete (4<sup>th</sup> ed.). Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, England (1995).

El efecto producido por el aireante, cuya composición es una mezcla de un alquil-bencen-sulfonato de sodio y lignosulfonato de sodio, es el de introducir en el mortero una cantidad limitada de aire en forma de microburbujas repartidas homogéneamente en toda la masa. Los resultados de la inclusión del aditivo son varios y en su mayoría muy beneficiosos.

En primer lugar mejora en gran medida la movilidad del mortero, siendo este mucho más dócil y manejable, ya que las microburbujas producen un efecto lubricante reduciendo la fricción entre las partículas de pizarra, de naturaleza lajosa en gran medida. Otro beneficio es la reducción de la densidad de los morteros frescos y endurecidos por la introducción del aire, lo que contribuye también a la mejora de la movilidad, comentada anteriormente, a evitar descuelgues al aplicar los morteros en vertical con espesores importantes y también a aligerar las unidades de obra en las que se utilicen estos morteros. Por último, otro gran beneficio de la introducción de las microburbujas es la notable disminución en la absorción de agua de los morteros endurecidos debido a la ruptura de la red de poros y capilares, creada en el proceso de fraguado de estos, por interposición de las microburbujas en dicha red capilar. El principal efecto negativo de la inclusión de aire en los morteros es la disminución de las resistencias mecánicas. Este aspecto se ha tenido en cuenta en el diseño de los morteros para cumplir con la condición de superar una resistencia mínima establecida inicialmente.

### 8.2.1.3. Densidad del mortero fresco

Las densidades de los morteros frescos diseñados están en torno a 2000 kg/m<sup>3</sup>, siendo este un valor muy común en los morteros de albañilería y de revoco y enlucido.

La inclusión de aditivos, fundamentalmente el aireante, supone una importante mejora en cuanto a las densidades de los morteros frescos ya que se produce una disminución de en torno a un 10% con respecto a las densidades de los morteros de referencia que no contienen aditivos. Dichos morteros de referencia, caracterizados en el capítulo 5, tienen altas densidades debido a su bajo contenido en aire y a la alta densidad de las pizarras.

Cabe destacar la baja densidad de la dosificación MIV 1,25PM112 2,0V5010N, en la que, al incluir el polímero dispersable, se refuerza la introducción de aire en el mortero disminuyendo mucho la densidad. Estos efectos dan lugar a un mortero sensiblemente más ligero, en comparación con las demás dosificaciones, y verdaderamente fácil de trabajar.

#### 8.2.1.4. Retención de agua

La retención de agua se comporta de forma contraria en los morteros de las dos pizarras. En el caso de los morteros fabricados con PIZ 1, este parámetro aumenta ligeramente, mientras que, en el caso de los morteros hechos con PIZ 4, la retención de agua sufre un ligero descenso.

En todo caso, en el transcurso de este trabajo se ha constatado que los morteros realizados con PIZ 4 retienen peor el agua cuando se incluyen en sus dosificaciones los aditivos.

Este parámetro no se incluye en las fichas técnicas de los morteros que se comercializan actualmente por lo que no se establece comparación alguna.

#### 8.2.1.5. Período de trabajabilidad

El tiempo que los morteros permanecen manejables para su utilización es muy amplio, siendo el menor valor obtenido de 190 minutos. Esto tiene aspectos positivos pero también connotaciones negativas. El tener un amplio margen de tiempo en el que los morteros permanecen amasados y preparados para usar es positivo, ya que permite optimizar los tiempos en obra, amasando más material de una sola vez y manteniéndolo preparado para su uso. También se facilita la posibilidad de corrección de errores o modificaciones en unidades de obra ejecutadas con estos morteros.

Por el contrario, períodos de trabajabilidad grandes conllevan procesos de curado mayores y tiempos de espera mayores cuando se requiere el endurecimiento de las unidades de obra ejecutadas para progresar con los trabajos.

Los tiempos de utilización de los morteros comerciales, incluidos en sus fichas técnicas, varían de forma considerable, siendo los valores más pequeños y más grandes encontrados de 35 y 225 minutos respectivamente. Los valores de los morteros estudiados en este capítulo se encuentran en el rango de los más altos.

La inclusión de aditivos ha supuesto un aumento importante de los períodos de trabajabilidad en comparación con los de los morteros iniciales, que eran 72 minutos en el caso del mortero con PIZ 1 y 45 minutos en el caso del mortero con PIZ 4.

### 8.3. Resultados de los ensayos de los morteros endurecidos

Los resultados que se han obtenido sobre los ensayos realizados a los morteros endurecidos se presentan en dos bloques.

En primer lugar se muestran los resultados de los diferentes ensayos realizados a los morteros endurecidos a los 28 días de curado de las piezas ensayadas.

En un segundo bloque se agrupan los ensayos de durabilidad, ya que todos ellos tienen un procedimiento más largo y todos están desarrollados con la finalidad de estudiar el envejecimiento de los morteros bajo condiciones ambientales severas.

### 8.3.1. Ensayos sobre morteros endurecidos a los 28 días de curado

En las tablas de la Figura 8.2 se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre probetas de morteros endurecidos a los 28 días de curado de estas. Se incluyen aquí resultados de densidad, de resistencias mecánicas y a la adhesión, de absorción de agua por capilaridad y de permeabilidad al vapor de agua.

MORTERO	DENSIDAD ENDURECIDO (Kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA FLEXIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN 28d (N/mm <sup>2</sup> )
MI 1,25PM112	1920	3,2	9,3
MI 1,25PM112 2,0V7031H	1930	3,5	8,9
MI 1,25PM112 15CL90-S	1930	2,5	9,4
MI 1,25PM112 15NHL-5	1910	3,5	11,3
MIV 1,25PM112	1910	2,7	9,0
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	1880	2,6	7,6

MORTERO	ENSAYO DE ADHESIÓN		ENSAYO A CORTANTE	
	RESISTENCIA (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO DE ROTURA	RESISTENCIA INICIAL A CORTANTE (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO DE ROTURA
MI 1,25PM112	0,49	A	0,82	Unión pieza/mortero
MI 1,25PM112 2,0V7031H	0,30	A	0,84	Unión pieza/mortero
MI 1,25PM112 15CL90-S	0,40	A	0,74	Unión pieza/mortero
MI 1,25PM112 15NHL-5	0,49	A	0,96	Unión pieza/mortero
MIV 1,25PM112	0,41	A	0,61	Unión pieza/mortero
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	0,38	A	0,68	Unión pieza/mortero

MORTERO	ABSORCIÓN POR CAPILARIDAD		COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (μ)
	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (Kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	PENETRACIÓN (mm)	
MI 1,25PM112	0,19	13	9
MI 1,25PM112 2,0V7031H	0,14	6	15
MI 1,25PM112 15CL90-S	0,19	16	10
MI 1,25PM112 15NHL-5	0,23	19	7
MIV 1,25PM112	0,34	17	8
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	0,35	23	7

Figura 8.2. Resultados de los ensayos sobre mortero endurecido

### 8.3.2. Análisis de los resultados de los morteros endurecidos

#### 8.3.2.1. Densidad del mortero endurecido

Una vez han endurecido, las densidades de los morteros están en torno a  $1900 \text{ kg/m}^3$ .

Cabe destacar el comportamiento de la dosificación MIV 1,25PM112 2,0V5010N. Este mortero presenta la mayor relación agua/cemento de todos los seleccionados para alcanzar la consistencia adecuada. Esto es debido a que se introduce una gran cantidad de aire que aligera mucho el mortero fresco, siendo este un factor importante a la hora de expandirse la pasta en la mesa de sacudidas en el ensayo de consistencia. Sorprendentemente, la densidad de esta dosificación, aun siendo la menor de todas, desciende bastante menos que las demás una vez endurece el mortero. Esto indica que la cantidad de agua retenida por el mortero es sensiblemente superior en este material que en el resto de los materiales caracterizados.

En la Figura 8.3 se representan las densidades de los morteros frescos y endurecidos de cada una de las dosificaciones estudiadas en este capítulo incluyendo también las densidades de los morteros de referencia. Se puede comprobar que la mejora con la introducción de aditivos es importante.

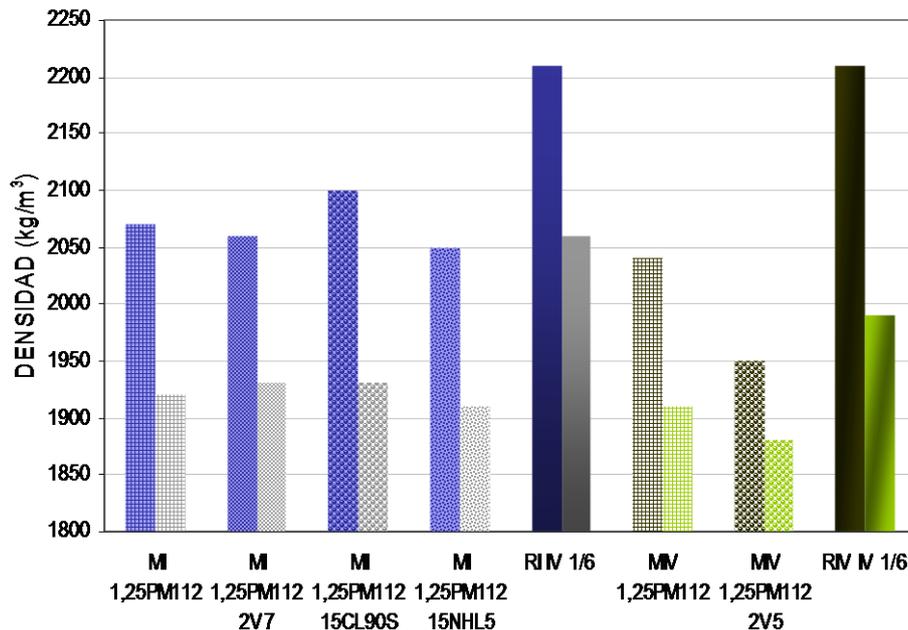


Figura 8.3. Densidades de los morteros frescos y endurecidos, incluidos los morteros de referencia. De cada pareja de valores el de la izda. corresponde a la densidad en fresco y el de la dcha. a la densidad del mortero endurecido

### 8.3.2.2. Resistencias mecánicas, compresión

Las resistencias a los 28 días de edad, tanto a flexión como a compresión, se ven afectadas de distinta forma por la inclusión de los aditivos en las dosificaciones.

La introducción de aire en los morteros da lugar a una disminución de las resistencias de diferente magnitud en las distintas muestras.

El aporte de cal natural al material compensa el efecto del aire debido, con toda probabilidad, al extra de conglomerante hidráulico que esta cal introduce. La cal aérea no produce ese efecto ya que su endurecimiento es un proceso mucho más lento.

Los morteros que incluyen polímeros dispersables sufren las mayores disminuciones en las resistencias a compresión en comparación con los morteros iniciales tomados como referencia para su mejora.

En el gráfico de la Figura 8.4 se representan las resistencias a compresión a los 28 días de edad (barras azules) y a los 90 días de edad (barras verdes) incluyendo también los resultados de las dosificaciones de referencia (colores sólidos). Se puede observar que las resistencias a 90 días siempre son mayores que a 28 días, sin embargo la progresión de estas es muy distinta dependiendo de la composición de los morteros.

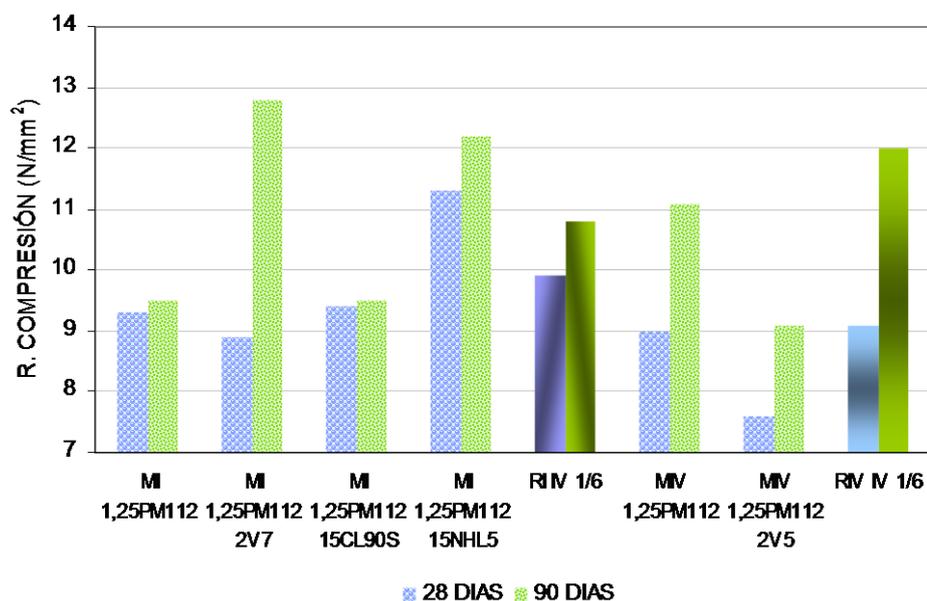


Figura 8.4. Resistencias a compresión a 28 días (azul) y a 90 días (verde) de los morteros endurecidos, incluidos los morteros de referencia

A pesar de las disminuciones constatadas, todos los morteros que se presentan en este capítulo cumplen con la premisa de superar 7,5 MPa de resistencia a compresión a los 28 días de edad. De esta forma, se podrían clasificar como M 7,5; si esta categoría estuviera incluida en la norma UNE-EN 998-2. A pesar de ello, muchos fabricantes denominan así a sus morteros, probablemente porque el actual Código Técnico de la Edificación hace referencia a esta categoría cuando recomienda los morteros a utilizar para conseguir las resistencias características a compresión de las fábricas usuales.

### 8.3.2.3. Resistencia a la adhesión

Los valores de adhesión alcanzados por los morteros estudiados se encuentran entre 0,3 y 0,5 N/mm<sup>2</sup>. Estos valores están en consonancia con los que declaran los fabricantes en las fichas técnicas, que están en los 0,3 N/mm<sup>2</sup> por término medio, declarándose en algún caso adhesiones de 0,5 N/mm<sup>2</sup>.

En comparación con los valores de adhesión alcanzados por los morteros de referencia, que no contienen aditivos, estos valores son similares, aunque no mejores, que aquellos. La disminución de los puntos de anclaje entre el mortero y el soporte cerámico debido al aumento en la cantidad de aire de los morteros puede ser la causa de que la adhesión no mejore y anule los efectos positivos que conlleva la introducción de aditivos.

La rotura se produce en todos los casos en la interfase mortero-soporte con lo que la resistencia a la adhesión es siempre la que nos proporciona el dinamómetro y las fuerzas que mantienen cohesionado al mortero son mayores que esta. En la figura 8.5 se incluye una imagen de una de las roturas realizadas.

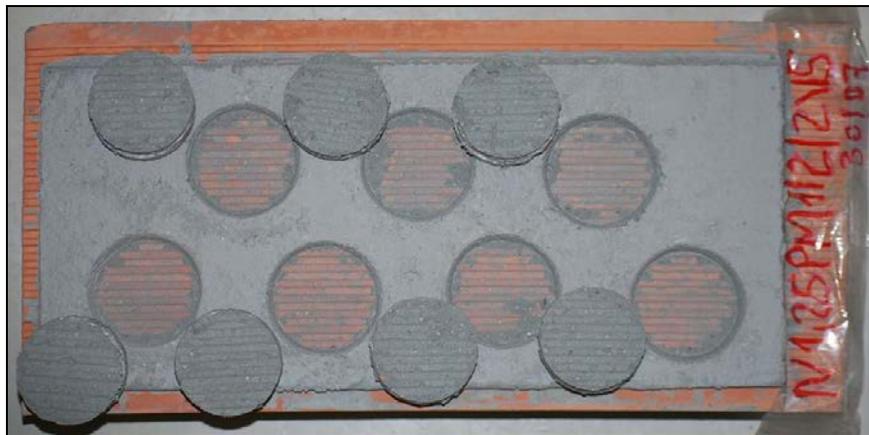


Figura 8.5. Probeta de ensayo de resistencia a la adhesión de mortero con rotura adhesiva en la interfase mortero-soporte

#### 8.3.2.4. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería

Los resultados del ensayo de resistencia inicial a cortante son mejores en estos morteros en comparación con los morteros de inicio. Todos los datos están por encima de  $0,6 \text{ N/mm}^2$ , mientras que los iniciales no superaban los  $0,5 \text{ N/mm}^2$ .

Los morteros existentes en el mercado, en su mayoría, no incluyen este dato y cuando lo hacen declaran valores tabulados según la norma UNE-EN 998-2, que pueden ser  $0,15$  o  $0,3 \text{ N/mm}^2$ , muy por debajo de los valores obtenidos en este estudio.

Las roturas que se observan en este ensayo siempre se dan en la unión mortero-soporte. En algunas ocasiones se despega todo el mortero de la superficie del ladrillo, mientras que en otras, parte del mortero se queda en cada cara de los dos ladrillos que une. El fallo se da en una o en las dos uniones de los tres ladrillos que forman la probeta.

En la Figura 8.6 se ilustra una rotura en la que ha quedado parte del mortero en cada ladrillo.



Figura 8.6. Resultado de la rotura de una probeta a cortante con separación del mortero en las tablas de los dos ladrillos

En este test se está comprobando la capacidad del mortero de permanecer unido al soporte frente a fuerzas externas que pretenden separarlos. En este sentido tiene similitud con el ensayo anterior, de resistencia a la adhesión. En dicho ensayo los resultados de las dosificaciones mejoradas no superaron los de las iniciales, mientras que en el de resistencia inicial a cortante sí que

mejoran. La explicación de esta diferencia de comportamiento puede deberse al tipo de probeta que se ensaya y al modo en el que se ejercen las fuerzas en cada ensayo. En el de resistencia a la adhesión se ejercen fuerzas verticales de tracción a una pastilla cilíndrica de 50 mm de diámetro. En estas condiciones la disminución del área efectiva de contacto del mortero con la pieza cerámica por la inclusión de microburbujas de aire cobra especial relevancia, ya que la superficie de adherencia es muy pequeña. En el ensayo a cortante las superficies de contacto son mucho mayores y las fuerzas son tangenciales, con lo que la mejora en la composición del mortero y la disminución de la relación agua-cemento con aumento de la trabajabilidad del mismo, da como resultado el aumento de estas resistencias en los morteros.

#### 8.3.2.5. Absorción por capilaridad

La absorción por capilaridad de los morteros diseñados se encuentra entre 0,14 y 0,35 kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>. Estos valores son comparables a los de los morteros hidrofugados que se comercializan. Algunos de estos morteros presentan valores menores de 0,40 kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>, clasificándose como W1, mientras que la mayoría de ellos declaran una absorción menor de 0,20 kg/m<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup> y se clasifican como W2 según la norma UNE-EN 998-2.

En el gráfico de la Figura 8.7 se incluyen las absorciones de los morteros caracterizados en este capítulo y las de los morteros de referencia, y se delimitan las tres zonas que recoge la norma para la clasificación de éstos en función de su absorción por capilaridad. Se observa la gran mejora en cuanto a la disminución de la absorción con respecto a los morteros iniciales, lo que permite clasificar los morteros mejorados como W1 o W2.

Es de señalar que el único mortero que contiene aditivo hidrofugante es el MI 1,25PM112-2,0V7031H, que es el de menor absorción de todos los ensayados.

También es de destacar la mayor absorción de los morteros realizados con PIZ 4 con respecto a los realizados con PIZ 1, debido a que, como ya se ha comentado, los finos de esta pizarra son menos absorbentes.

Estas absorciones se ven muy bien reflejadas cuando se abren las probetas después del ensayo y se estudian las huellas de penetración dejadas por el agua. En la Figura 8.8 se incluyen dos imágenes, con la mayor y la menor huella obtenidas, en las que la diferencia en el avance del frente de agua queda patente.

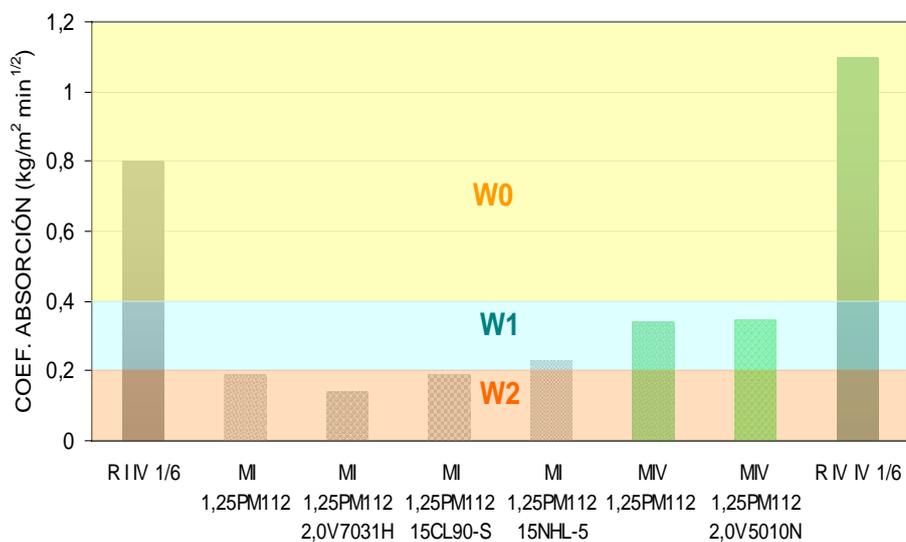


Figura 8.7. Coeficientes de absorción por capilaridad de los morteros, incluidos los de referencia. Límites de las distintas clasificaciones s/UNE-EN 998-2

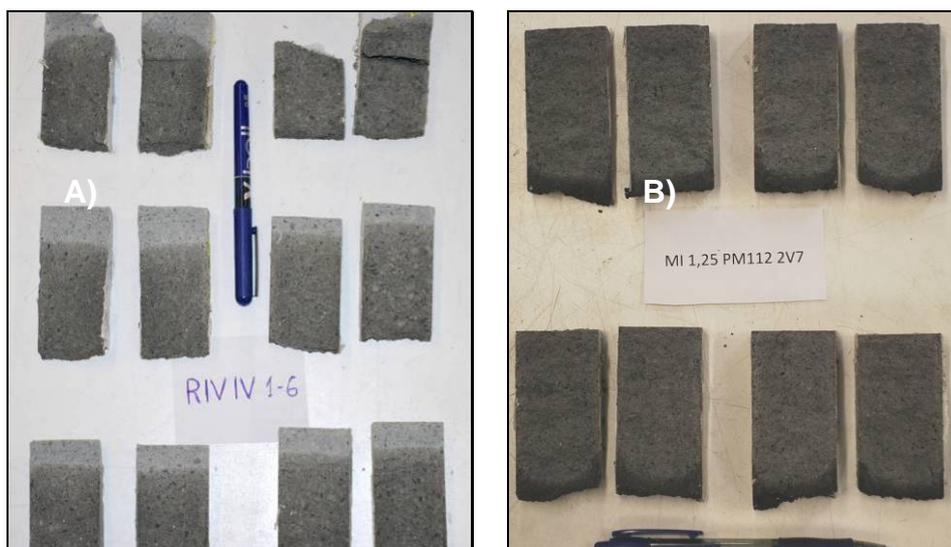


Figura 8.8. Huellas dejadas por el agua en las probetas en el ensayo de absorción por capilaridad. A) R IV 1-6; B) MI 1,25 PM112 2,0V7031H

La disminución de la absorción de agua de los morteros se debe, en gran medida, a la inclusión de microburbujas que obstruyen la red de poros y capilares que se desarrolla en los morteros durante el fraguado, haciendo estos menos absorbentes. En el caso del mortero que contiene el polímero dispersable con propiedades hidrofugantes, estas se suman a la acción del aireante.

### 8.3.2.6. Permeabilidad al vapor de agua

Los morteros seleccionados, caracterizados en este capítulo, tienen coeficientes de permeabilidad entre 7 y 10, a excepción del mortero que incluye hidrofugante, cuyo coeficiente de permeabilidad es de 15.

Los morteros de referencia, con alta densidad y bajo contenido en aire y sin aditivos, presentaban valores de coeficientes de permeabilidad de 15 y 11 con lo que, teniendo en cuenta que a mayor coeficiente menor permeabilidad al vapor de agua, se puede decir que los morteros evolucionados presentan mejores valores de permeabilidad que los de inicio, a excepción del mortero hidrofugado.

Las fichas técnicas de los morteros comerciales proporcionan datos de permeabilidad que en su mayoría extraen de las tablas de la norma UNE-EN 1745, en la que se exponen métodos para determinar los valores térmicos de proyecto y se asignan coeficientes de permeabilidad en función de la densidad y conductividad térmica del material. Así, los coeficientes de permeabilidad más repetidos son los que se encuentran entre 15 y 35. Estas permeabilidades son más bajas que las de los morteros aquí expuestos.

La mayor permeabilidad al vapor de agua de los morteros se debe también a la inclusión de microburbujas de aire en los morteros. Estas burbujas son lo suficientemente pequeñas para obstruir las redes capilares que se crean en el mortero y así dar lugar a morteros poco absorbentes, como se vio en el punto anterior. Sin embargo estas microburbujas, numerosas y muy repartidas, dan lugar a una red de capilares y poros de más pequeño tamaño donde las gotas de agua no pueden acceder por capilaridad debido a sus dimensiones, pero si el agua en forma de vapor o, incluso, el agua líquida sometida a presión, lo que ocurre en los episodios de hielo-deshielo o cuando se expone al mortero a procesos de absorción muy prolongados en el tiempo<sup>135</sup>.

Cuando hay microburbujas de aire distribuidas en el mortero, la red de capilares y poros de pequeño tamaño se genera homogéneamente repartida en la masa de mortero y es más efectiva a la hora de permitir el paso de vapor de agua que las redes de poros y capilares de mayor tamaño que se generan, de forma más localizada, en los morteros que no incluyen el aditivo.

Por este motivo los coeficientes de permeabilidad de los morteros aditivados disminuyen con relación a los iniciales, a excepción del mortero que incluye el polímero dispersable con características hidrofugantes, ya que este aditivo aporta al mortero un comportamiento hidrófobo que produce un rechazo a la presencia de agua en su proximidad.

---

<sup>135</sup> Garbalinska, H., A Wygocka, A., Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance. *Construcción and Building Materials*. 51 (2014): 258-266.

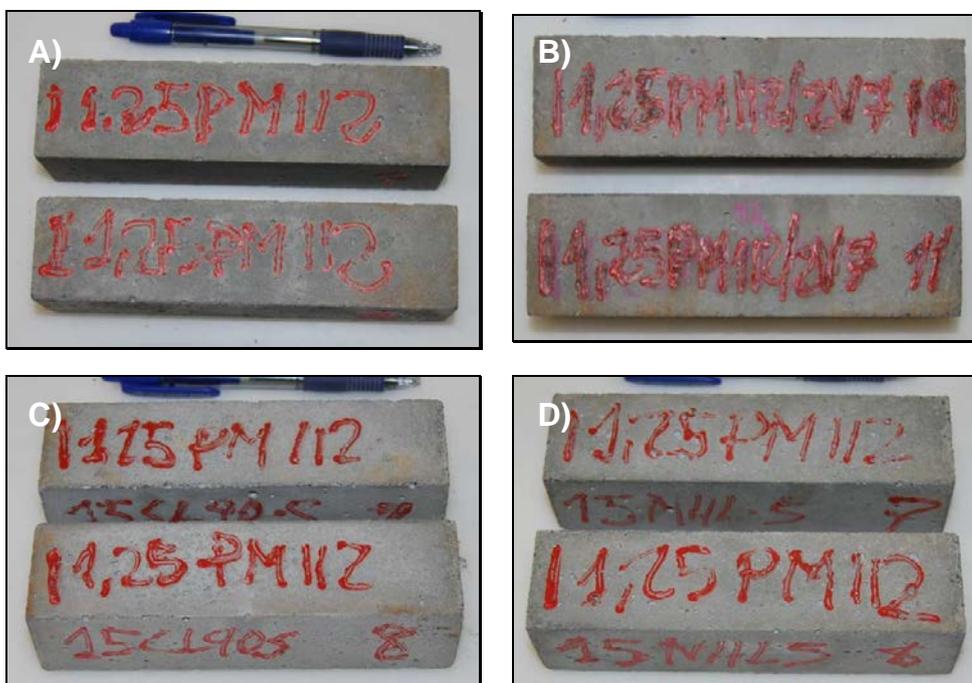
### 8.3.3. Ensayos de durabilidad de los morteros endurecidos

En este apartado se incluyen los resultados de los ensayos de durabilidad que se han realizado a los morteros endurecidos. Se incluyen 4 ensayos: Ensayo al dióxido de azufre (Kesternich), heladicidad, resistencia a la cristalización de sales y el ensayo de reactividad álcali-sílice y álcali-silicato mediante el método acelerado en probetas de mortero. Los tres primeros ensayos se realizan sobre probetas prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm debidamente curadas durante 28 días. En el caso del ensayo de reactividad se hace una adaptación de la norma para su realización con las dosificaciones que se quieren analizar.

#### 8.3.3.1. Ensayo al dióxido de azufre (kesternich)

Las probetas se han sometido a 15 ciclos de exposición al dióxido de azufre, tras los cuales se han lavado y secado para proceder a la valoración de los resultados del ensayo.

Se ha realizado una inspección visual, en la que no se observan cambios importantes en el color de los morteros, ni aparición de alteraciones, fracturas o pérdidas de material en las probetas. En la Figura 8.9 se incluyen imágenes que muestran el estado de las probetas después de los ciclos.



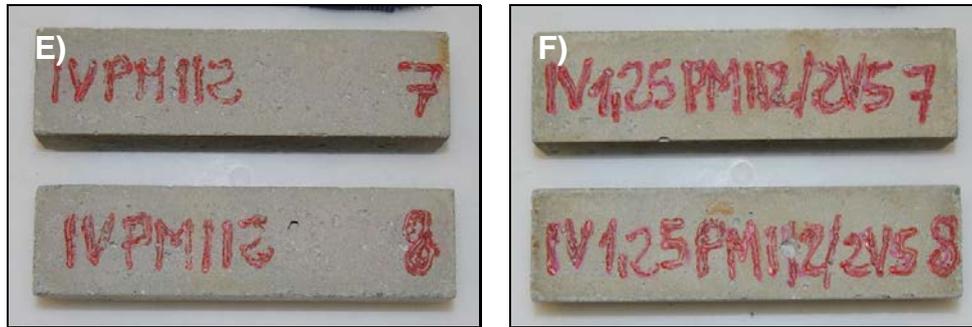


Figura 8.9. Aspecto de las probetas de mortero después de los ciclos en el ensayo al dióxido de azufre. A) MI 1,25PM112; B) MI 1,25PM112 2,0V7031H; C) MI 1,25PM112 15CL90-S; D) MI 1,25PM112 15NHL-5; E) MIV 1,25PM112; F) MIV 1,25PM112 2,0V5010N

A continuación se presentan las variaciones de masa sufridas por las probetas en el transcurso del ensayo (Figura 8.10).

MORTERO	MASA DE LAS PROBETAS (g)		VARIACIÓN DE MASA (%)
	ANTES	DESPUÉS	
MI 1,25PM112 (7)	465,1	468,1	0,6
MI 1,25PM112 (8)	463,7	466,7	0,6
MI 1,25PM112 2,0V7031H (10)	489,6	492,5	0,6
MI 1,25PM112 2,0V7031H (11)	493,4	495,9	0,5
MI 1,25PM112 15CL90-S (7)	474,6	478,6	0,8
MI 1,25PM112 15CL90-S (8)	477,4	481,8	0,9
MI 1,25PM112 15NHL-5 (7)	482,6	486,6	0,8
MI 1,25PM112 15NHL-5 (8)	477,8	481,8	0,8
MIV 1,25PM112 (7)	471,2	474,1	0,6
MIV 1,25PM112 (8)	477,5	480,1	0,5
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (7)	454,6	457,0	0,5
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (8)	464,1	466,6	0,5

Figura 8.10. Variaciones de las masas en probetas sometidas a ciclos con SO<sub>2</sub>

Todos los morteros sufren un aumento de peso que oscila entre un 0,5 y un 0,9% con respecto de la masa inicial de las probetas.

En la tabla de la Figura 8.11 se incluyen los datos de resistencias a compresión de las probetas sometidas a los ciclos con SO<sub>2</sub>, y la relación entre estas con las resistencias a compresión de las probetas de referencia que tienen la misma edad pero no han sido sometidas a ciclos.

Las resistencias a compresión aumentan en todos los casos después de someterse las probetas a la acción del dióxido de azufre. Este aumento es muy variable en función de la dosificación del mortero.

MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (%)
	SIN CICLOS	CON CICLOS	
MI 1,25PM112	9,5	12,7	33,7
MI 1,25PM112 2,0V7031H	12,8	14,2	10,9
MI 1,25PM112 15CL90-S	9,5	15,5	63,2
MI 1,25PM112 15NHL-5	12,2	17,1	40,2
MIV 1,25PM112	11,1	12,7	14,4
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	9,1	11,4	25,3

Figura 8.11. Variaciones de las resistencias a compresión en probetas sometidas a ciclos con SO<sub>2</sub> respecto a probetas de referencia

Como ya se comentó en el capítulo 5, los ligeros aumentos de peso sufridos por las probetas ensayadas pueden ser debidos a la formación de sulfatos alcalinos y alcalinotérreos en los poros de las probetas, pero también cabe pensar que se lleven a cabo procesos de inclusión de agua en la hidratación de partículas o núcleos de partículas de cemento sin hidratar, en un proceso similar al que se ha estudiado en los fenómenos de auto-curado de las microgrietas de retracción que aparecen en los hormigones jóvenes<sup>136, 137</sup>.

<sup>136</sup> Huang, H., Ye, G., Damidot, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*. 52 (2013) p 71-81.

<sup>137</sup> Lv, Z., Chen, H. Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials. *Materials and Structures*. 11 (2013) p 1881-1892.

Estos fenómenos de hidratación tardía explicarían el significativo aumento de las resistencias a compresión de las probetas ensayadas con respecto a las de referencia.

En la Figura 8.12 se incluyen imágenes y análisis del microscopio electrónico de barrido en las que se observan los cristales de sulfato, bien formados, en los poros de los morteros ensayados.

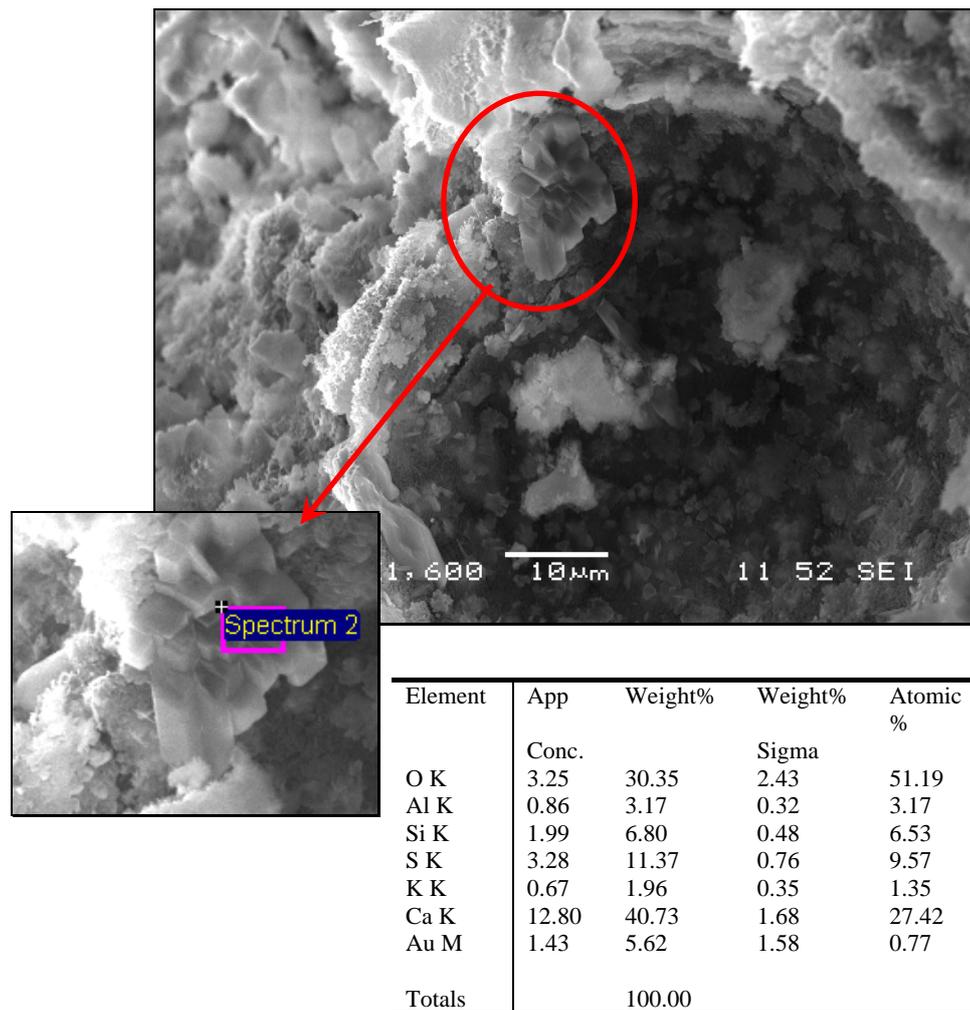


Figura 8.12. Cristales de sulfato cálcico en un poro de una probeta de mortero, sometida a ensayo al dióxido de azufre (Kesternich), incluida su composición elemental

Los aumentos en las resistencias a compresión son notables en todas las dosificaciones, siendo el menor el del mortero que contiene hidrofugante, que muestra una absorción por capilaridad y permeabilidad al vapor menores y,

por tanto los efectos de los ciclos de SO<sub>2</sub> no son tan grandes como en los demás.

Se puede concluir, pues, que los morteros seleccionados muestran un buen comportamiento frente a ambientes potencialmente contaminantes, como podrían ser los de zonas industriales con alta densidad de ocupación.

#### 8.3.3.2. Heladicidad

De nuevo, para la valoración de los efectos de los ciclos hielo-deshielo sobre las probetas de mortero se evaluarán los tres aspectos citados en el capítulo 5: La inspección visual del aspecto exterior, la medición de las variaciones de masa y la comparación de la resistencia a compresión de las probetas sometidas a los ciclos con probetas de referencia de la misma edad y que no han sido sometidas a ciclos.

En la Figura 8.13 se puede comprobar el estado final de las probetas después de los ciclos. Las probetas de las diferentes dosificaciones mantienen su forma e integridad completamente y no se observan pérdidas de masa ni defectos superficiales de ningún tipo. El único cambio apreciable es una ligera pérdida de la pasta de cemento superficial que permite ver el árido, sobre todo en la cara de la probeta que no queda en contacto con ninguna superficie del molde en su fabricación.

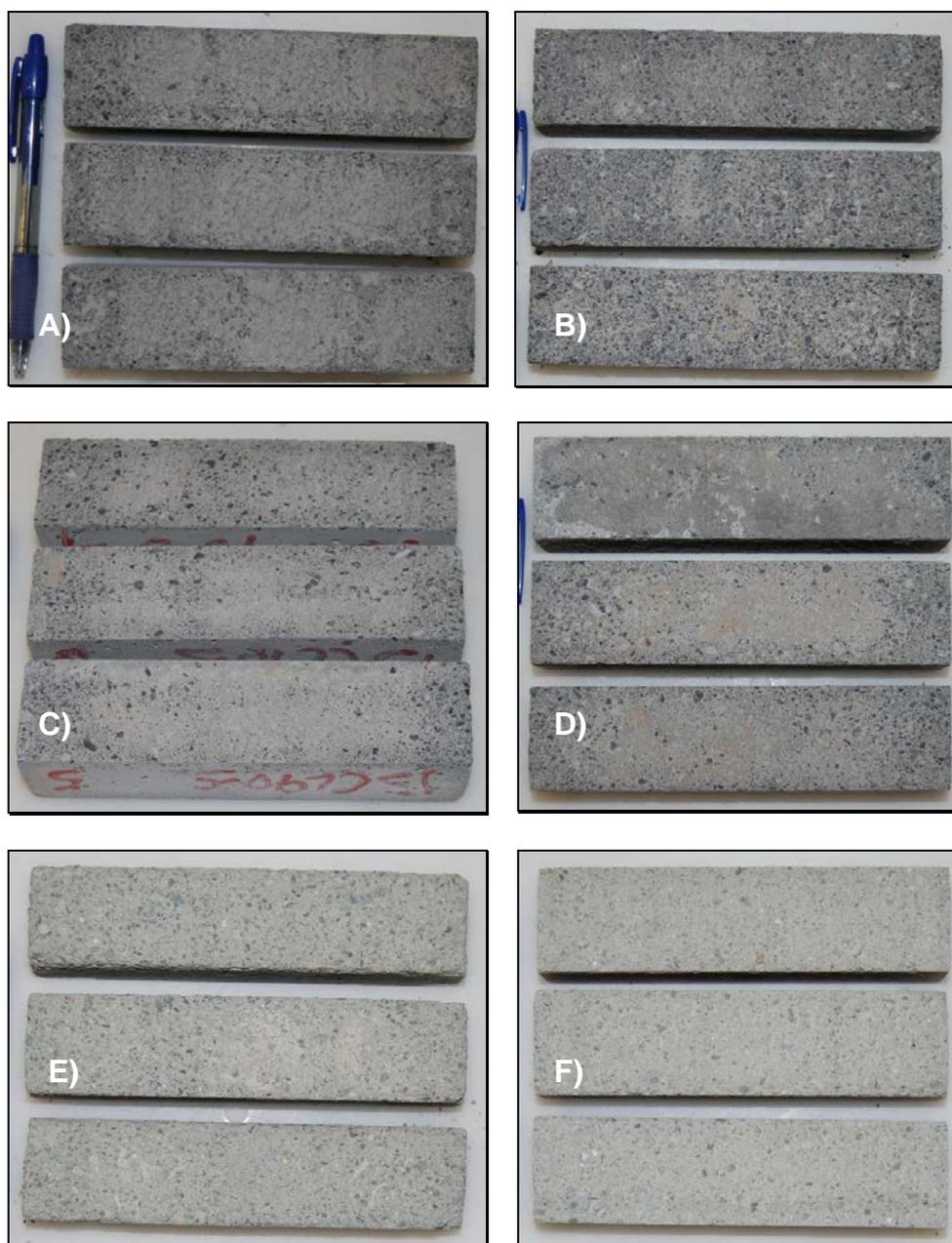


Figura 8.13. Aspecto de las probetas de mortero después de los ciclos hielo-deshielo. A) MI 1,25PM112; B) MI 1,25PM112 2,0V7031H; C) MI 1,25PM112 15CL90-S; D) MI 1,25PM112 15NHL-5; E) MIV 1,25PM112; F) MIV 1,25PM112 2,0V5010N

A continuación se presentan las variaciones de masas sufridas por las probetas ensayadas, con respecto a las masas iniciales de las mismas (Figura 8.14).

MORTERO	MASA DE LAS PROBETAS (g)		VARIACIÓN DE LA MASA (%)
	ANTES	DESPUÉS	
MI 1,25PM112 (4)	462,1	460,2	-0,4
MI 1,25PM112 (5)	461,2	458,9	-0,5
MI 1,25PM112 (6)	462,3	460,4	-0,4
MI 1,25PM112 2,0V7031H (7)	503,1	499,4	-0,7
MI 1,25PM112 2,0V7031H (8)	506,4	502,3	-0,8
MI 1,25PM112 2,0V7031H (9)	490,3	486,2	-0,8
MI 1,25PM112 15CL90-S (4)	480,5	479,4	-0,2
MI 1,25PM112 15CL90-S (5)	477,6	476,8	-0,2
MI 1,25PM112 15CL90-S (6)	472,9	472,1	-0,2
MI 1,25PM112 15NHL-5 (4)	494,4	493,4	-0,2
MI 1,25PM112 15NHL-5 (5)	490,5	488,9	-0,3
MI 1,25PM112 15NHL-5 (6)	489,2	487,4	-0,4
<b>MIV 1,25PM112</b>			
MIV 1,25PM112 (4)	473,0	462,4	-2,2
MIV 1,25PM112 (11)	478,3	468,8	-2,0
MIV 1,25PM112 (6)	471,7	462,6	-1,9
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (4)	449,8	447,5	-0,5
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (5)	452,6	449,2	-0,8
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (6)	451,5	448,3	-0,7

Figura 8.14. Variaciones de las masas en probetas sometidas a heladicidad

Todas las muestras sufren una pérdida de masa menor al 1%, excepto en el caso de la dosificación con PIZ 4 y plastificante aireante, con pérdidas en torno al 2%.

La siguiente tabla recoge los resultados de resistencias a compresión de las probetas sometidas al ensayo de heladicidad y la variación entre estas resistencias y las obtenidas con probetas de referencia que no se han sometido al ensayo (Figura 8.15).

MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (%)
	SIN CICLOS	CON CICLOS	
MI 1,25PM112	9,5	12,0	26,3
MI 1,25PM112 2,0V7031H	12,8	13,6	6,2
MI 1,25PM112 15CL90-S	9,5	14,3	50,5
MI 1,25PM112 15NHL-5	12,2	17,2	41,0
MIV 1,25PM112	11,1	11,5	3,6
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	9,1	9,9	8,8

Figura 8.15. Variaciones de las resistencias a compresión en probetas sometidas a ciclos hielo-deshielo respecto a probetas de referencia

Las resistencias mecánicas aumentan cuando los morteros son sometidos a ciclos hielo-deshielo. Los porcentajes de aumento en los diferentes morteros son muy diferentes.

A pesar de los lavados superficiales de la pasta de cemento, las probetas han sufrido unas pérdidas de peso muy pequeñas, menores del 1% en todos los casos, excepto en la dosificación MIV 1,25PM112, que se aproxima al 2%. Estas disminuciones de masa tan pequeñas, habiéndose eliminado una buena cantidad de pasta de cemento, permiten pensar que parte del agua en la que se sumergen las probetas en los ciclos se ha integrado en el mortero, pudiendo haberse formado silicatos cálcicos hidratados que lo reforzarían.

Este reforzamiento explicaría el aumento en la resistencia a compresión que han experimentado las probetas de todas las dosificaciones sometidas a los ciclos con respecto a las de referencia.

Cabe destacar que los aumentos en las resistencias han sido muy dispares. En los morteros con PIZ 1, el menor aumento lo experimenta la dosificación

que incluye aditivo hidrofugante, lo que puede ser debido a que, por su comportamiento hidrófobo, el agua se difunde peor por el interior del mortero y se produce menor formación de nuevos silicatos cálcicos hidratados y, por tanto, menor refuerzo de las resistencias.

El caso contrario sería el de las dosificaciones que incluyen cales. La cal, de alta superficie específica, retiene bastante agua en el amasado de los morteros, sin embargo no es necesario aumentar en gran medida el agua de amasado para tener buena trabajabilidad, porque la cal aporta mucha plasticidad y elasticidad a la masa. Esto puede ocasionar una escasez de agua de hidratación del cemento, provocando una disminución de la eficacia de la hidratación de las partículas de cemento<sup>138</sup>. Al realizar los ciclos e introducir las probetas en agua durante tiempo prolongado, se hidratarían las partículas de cemento formando nuevos silicatos que darían lugar a los grandes aumentos de resistencia que se han medido.

En el caso de los morteros con PIZ 4, los aumentos de resistencia que han experimentado son bastante pequeños. Esto puede deberse a la mayor absorbencia de estos morteros con respecto a los de la PIZ 1, y a la distinta composición de los finos de ambas pizarras.

Los finos de la pizarra 4 son más absorbentes que los de la pizarra 1, con lo que se retendrá mayor cantidad de agua en las probetas y al efecto positivo de la hidratación de partículas de cemento se opondría el efecto negativo de las presiones disruptivas del agua al helarse y aumentar de volumen.

Con toda probabilidad, el efecto de las microburbujas que incluye el aditivo aireante, es el principal motivo por el que la respuesta a los ciclos hielo-deshielo mejora en relación a los morteros iniciales. En la Figura 8.16 se incluye una fotografía realizada con el microscopio electrónico a una muestra de mortero MI 1,25PM112, donde se observa la cantidad, tamaño y distribución de estas microburbujas en el material.

---

<sup>138</sup> Ince, C., Ozturk, Y., Carter, M.A. et ál. The influence of supplementary cementing material on water retaining characteristics of hydrated lime and cement mortars in masonry construction. *Materials and Structures*. 47 (3) (2014): p 493-501.

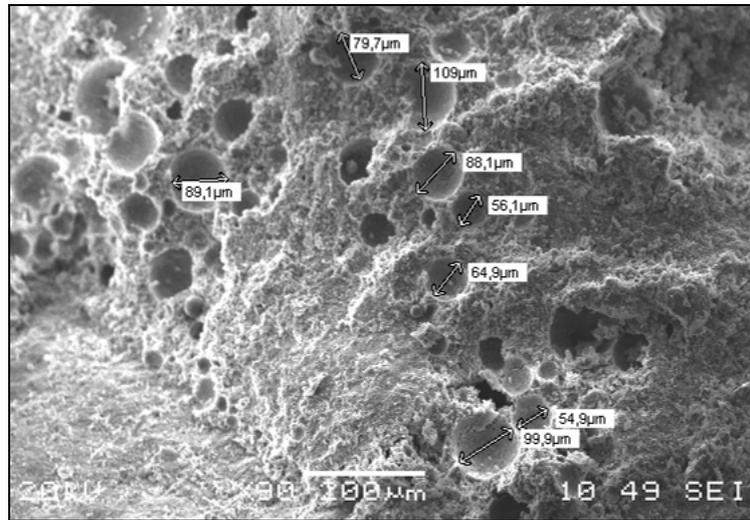


Figura 8.16. Imagen SEM de mortero donde se aprecian las microburbujas con su tamaño y distribución

Estas microburbujas cierran los canales de poros y capilares de tamaño grande y medio y dan lugar a la formación de ramificaciones de capilares y poros de mucho menos tamaño y más uniformemente distribuidas en la masa de mortero. Cuando el agua que ha podido entrar en los poros del mortero comienza a congelarse aumenta de volumen, desplazando hacia los capilares al agua líquida que tiene a su alrededor. Estos capilares están interrumpidos por las burbujas, que al mismo tiempo actúan como zona de expansión para esa agua líquida. De esta forma se evita el avance de la congelación y se protege al mortero<sup>139</sup>.

Si se observa la Figura 5.31 se puede ver que las superficies de las probetas de los morteros iniciales, a las que se les sometió a ciclos hielo-deshielo, presentan grandes poros en su superficie cuando se ha eliminado la pasta de cemento exterior por acción de los ciclos. Estos grandes poros no se observan en las probetas de los morteros mejorados, así como tampoco han sufrido las pérdidas de material que han sufrido los de referencia.

Con lo observado se deduce que los morteros mejorados presentan una respuesta correcta frente a las heladas, mientras que los iniciales empeoran en sus propiedades cuando se enfrentan a estos ambientes.

<sup>139</sup> Fernández Cánovas, M., Hormigón (10ª ed). Ibergarceta Publicaciones, S.L., Madrid (2013).

El gráfico de la Figura 8.17 refleja las diferencias en la resistencia a compresión de probetas sometidas a ciclos de heladicidad y probetas no sometidas a esos ciclos (referencia). Se incluye, con un punto azul y la cifra correspondiente, la variación de estas resistencias en porcentaje, así como los resultados de las dosificaciones iniciales estudiadas en el capítulo 5.

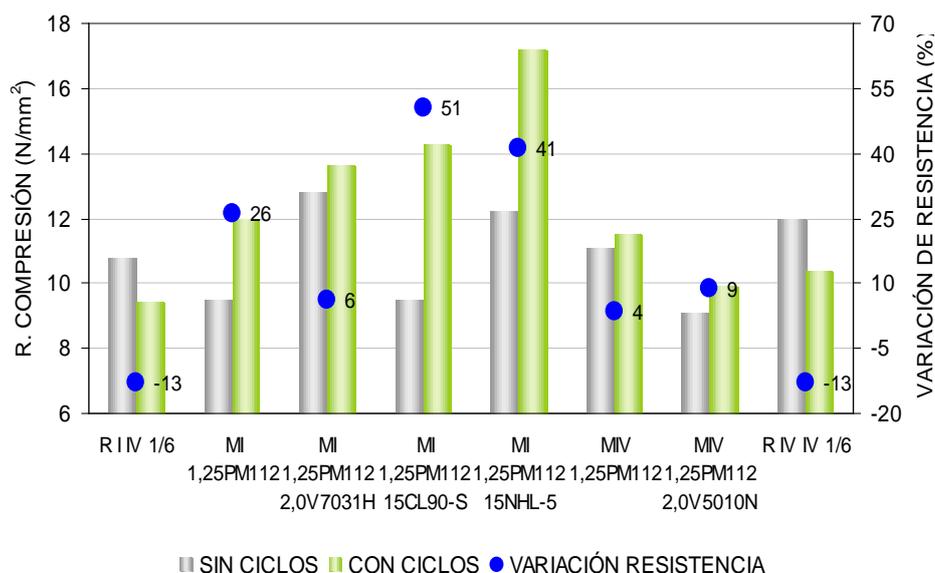


Figura 8.17. Resultados de resistencia a compresión de probetas sometidas a ciclos hielo-deshielo (verde) y probetas de referencia (gris). En azul se representa la variación de las resistencias. Se incluyen las dosificaciones iniciales en los extremos del gráfico

### 8.3.3.3. Resistencia a la cristalización de sales

Como en los dos ensayos anteriores, los aspectos a valorar en los morteros, después de 15 ciclos de inmersión en disolución de sulfato sódico y secado en estufa, son el aspecto de las probetas mediante inspección visual, la pérdida o ganancia de masa después de los ciclos de cristalización y la variación de la resistencia a compresión que sufren las probetas ensayadas con respecto a las de referencia, que no han sido sometidas a los ciclos.

En las imágenes de la Figura 8.18 se puede observar el estado final en el que se encuentran las probetas que se han sometido al ensayo.

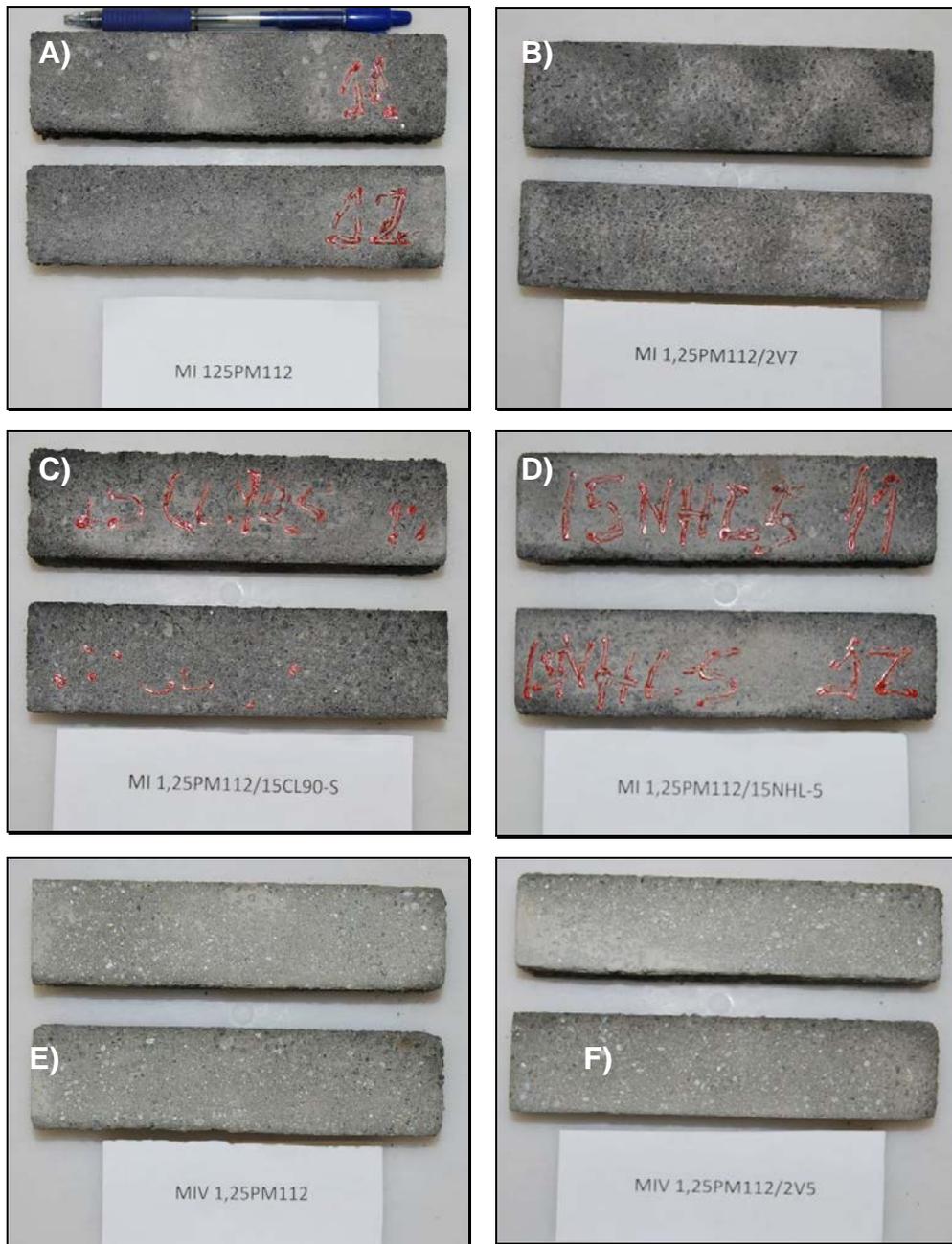


Figura 8.18. Aspecto de las probetas de mortero después de los ciclos de cristalización de sales. A) MI 1,25PM112; B) MI 1,25PM112 2,0V7031H; C) MI 1,25PM112 15CL90-S; D) MI 1,25PM112 15NHL-5; E) MIV 1,25PM112; F) MIV 1,25PM112 2,0V5010N

Visualmente se aprecia pérdida de la pasta en prácticamente todas las caras de las probetas, quedando visibles los granos de árido de pizarra. No se registra pérdida de la forma prismática de las probetas pero se advierten ligeros redondeos en algunas aristas y vértices. No se observan grietas, fisuras ni pérdidas de masa por rotura, como sí ocurrió en algunas de las probetas iniciales cuyos ensayos se presentaron en el capítulo 5.

Las variaciones en las masas de las probetas antes y después del ensayo se incluyen en la tabla de la Figura 8.219.

MORTERO	MASA DE LAS PROBETAS (g)		VARIACIÓN DE LA MASA (%)
	ANTES	DESPUÉS	
MI 1,25PM112 (11)	468,8	467,6	-0,3
MI 1,25PM112 (12)	470,3	461,2	-1,9
MI 1,25PM112 2,0V7031H (14)	499,4	499,3	0,0
MI 1,25PM112 2,0V7031H (15)	499,1	501,2	0,4
MI 1,25PM112 15CL90-S (11)	466,4	475,5	2,0
MI 1,25PM112 15CL90-S (12)	484,4	496,6	2,5
MI 1,25PM112 15NHL-5 (11)	493,1	506,1	2,6
MI 1,25PM112 15NHL-5 (12)	482,6	498,3	3,3
MIV 1,25PM112 (12)	487,3	490,3	0,6
MIV 1,25PM112 (13)	485,6	477,2	0,3
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (11)	462,6	468,6	1,3
MIV 1,25PM112 2,0V5010N (12)	461,4	468,2	1,5

Figura 8.19. Variaciones de las masas en probetas sometidas a ciclos de cristalización de

A pesar de las pérdidas superficiales de mortero en las probetas, las masas de estas aumentan en el transcurso del ensayo en todos los morteros excepto en uno. Estos aumentos son variables en función del tipo de mortero estudiado, siendo el mayor de ellos de algo más del 3%.

A continuación se presentan los resultados de las resistencias a compresión de las probetas ensayadas, así como las variaciones de estas con respecto a las probetas tomadas como referencia (Figura 8.20).

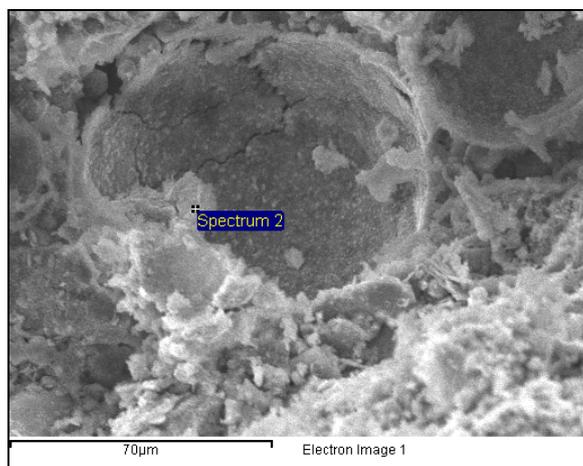
MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (%)
	SIN CICLOS	CON CICLOS	
MI 1,25PM112	9,5	15,6	64,2
MI 1,25PM112 2,0V7031H	12,8	16,2	26,6
MI 1,25PM112 15CL90-S	9,5	17,0	78,9
MI 1,25PM112 15NHL-5	12,2	23,6	93,4
MIV 1,25PM112	11,1	14,9	34,2
MIV 1,25PM112 2,0V5010N	9,1	14,5	59,3

Figura 8.20. Variaciones de las resistencias a compresión en probetas sometidas a ciclos de cristalización de sales respecto a probetas de referencia

Las resistencias a compresión de las muestras ensayadas reflejan aumentos muy importantes en las probetas sometidas al ensayo de cristalización de sales. Estos aumentos son notablemente diferentes en función de la composición de los morteros, llegando a superar el 90% en el mayor de los casos.

En lo referente a la masa antes y después del ensayo, las probetas tienden a aumentar de peso por la precipitación de sulfato de sodio en su interior, a pesar de perder buena parte de la pasta de cemento que recubre superficialmente dichas probetas. La presencia de estas sales se ha comprobado, de nuevo, verificando cualitativamente el contenido de sulfatos en probetas ensayadas y probetas sin ensayar, y comparando visualmente la cantidad de sulfato de bario precipitado en ambas.

También se han estudiado las muestras sometidas a los ciclos mediante microscopía electrónica de barrido. En la Figura 8.21 se incluye imagen y análisis por difracción de rayos X, de una de las muestras.



Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	7.90	0.5950	44.71	1.97	66.21
Na K	1.25	0.7286	5.75	0.64	5.93
Al K	0.83	0.7667	3.66	0.40	3.21
Si K	1.81	0.8408	7.23	0.52	6.10
S K	1.17	0.8203	4.81	0.55	3.55
K K	0.39	1.0278	1.26	0.30	0.76
Ca K	5.29	0.9695	18.35	0.90	10.85
Fe K	1.38	0.8425	5.52	0.82	2.34
Au M	1.93	0.7451	8.70	1.61	1.05
Totals			100.00		

Figura 8.21. Imagen SEM y análisis EDX de un depósito de sulfato en la superficie de un poro en el mortero

En la imagen de la Figura 8.22 se observa perfectamente el frente de penetración de la disolución de sulfato en el interior de una de las probetas ensayadas. De esta forma se puede verificar la profundidad de penetración que alcanza la disolución en las muestras.

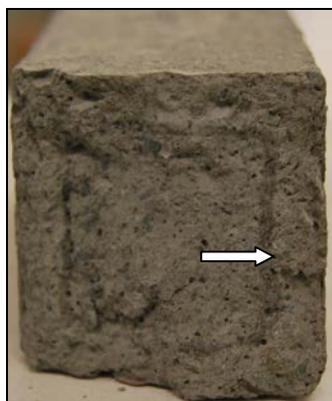


Figura 8.22. Sección de probeta rota a flexión. La flecha señala la marca de penetración de la disolución de sales en el interior de la probeta

Pero las ganancias de peso, como en los anteriores ensayos de durabilidad, también se deben atribuir a la hidratación de partículas o núcleos de partículas de cemento que generan nuevas formaciones de silicatos cálcicos, responsables del gran aumento observado en las resistencias mecánicas.

En la Figura 8.23 se incluye un gráfico con las resistencias de las probetas sometidas a ciclos, en verde, frente a las resistencias de las probetas de referencia que, teniendo la misma edad, no han sido sometidas a ciclos de cristalización de sales antes de su rotura, en azul. También se representa en el gráfico la variación de las resistencias en porcentaje en anaranjado, con su valor numérico al lado. Se han incluido también las dosificaciones iniciales.

Como en los ensayos anteriores, las dosificaciones con cal son las que mayor aumento de resistencia a compresión presentan, mientras que la dosificación con aditivo hidrofugante es la que muestra un aumento más contenido en su resistencia.

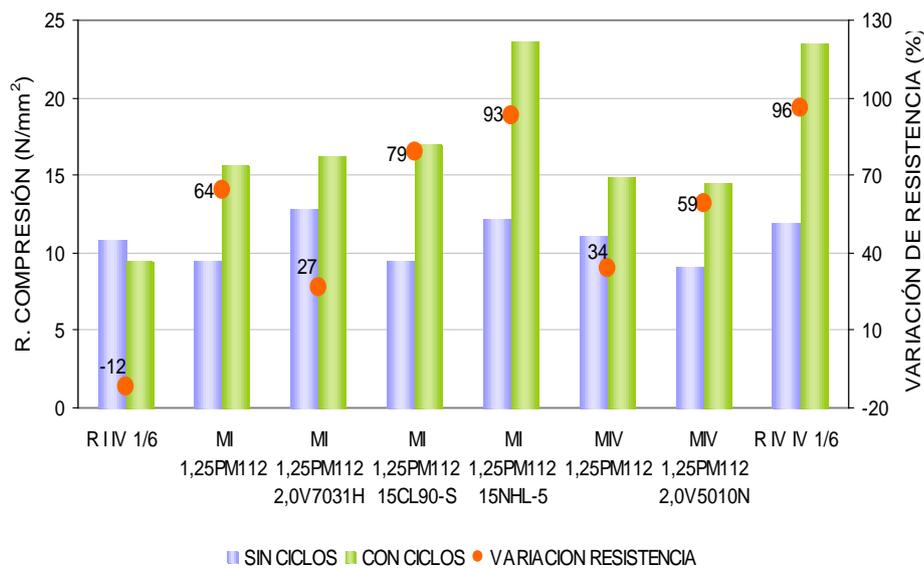


Figura 8.23. Resultados de resistencia a compresión de probetas sometidas a ciclos de cristalización de sales (verde) y probetas de referencia con la misma edad (azul). En anaranjado se representa la variación de las resistencias. Se incluyen las dosificaciones iniciales en los extremos del gráfico

La progresión de este ensayo parece pasar por una etapa en la que los morteros se enriquecen en sulfatos, al someterse a la sucesión de inmersiones en disolución y posterior secado en estufa, y adquieren más resistencia por la formación de nuevos silicatos. Esto sucede hasta que las presiones disruptivas de las sales, que se acumulan y aumentan de volumen en el interior de los morteros, son capaces de agrietarlos. Llegados a este punto la degeneración es muy rápida, abriéndose grandes fisuras en corto

espacio de tiempo y llevando al mortero, incluso, a la pérdida de su integridad y, por tanto, a su fragmentación.

Como conclusión sobre la respuesta de los morteros seleccionados a la cristalización de sales expansivas en su interior, se puede decir que el comportamiento de todas las dosificaciones ha sido correcto. Los materiales ofrecen una adecuada resistencia a los efectos de la penetración de las sales en su interior.

#### 8.3.3.4. Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato

Se ha realizado el ensayo de reactividad álcali-sílice y álcali-silicato mediante el método acelerado en probetas de mortero, modificándolo de tal manera que, en lugar de fabricar un mortero para evaluar un árido, con la granulometría y el cemento que especifica la norma UNE 14650 EX, tomada como referencia, se ensayan las dosificaciones reales que contienen el árido que se quiere estudiar. De esta forma se intenta verificar si los morteros diseñados consiguen evitar el desarrollo de reactividades por parte de las pizarras, que han demostrado ser áridos potencialmente reactivos

En la Figura 8.24 se incluye el gráfico elongación/tiempo, que resulta de las mediciones, en días sucesivos, de las variaciones en la longitud de las probetas de reactividad que se mantienen en disolución de hidróxido sódico a 80°.

Ninguna dosificación supera el 0,02% de elongación a los 28 días, muy por debajo de la elongación del 0,1% que la norma establece como índice para considerar la posibilidad de reactividad de un árido.

En el capítulo 6 se estudió la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato por el método acelerado en probetas de mortero para las dosificaciones iniciales con cemento tipo II y tipo IV. En ese ensayo se procedió con una modificación a la norma de referencia que consistía en la sustitución del cemento tipo I, con el que la norma observa la realización del ensayo, por los cementos tipo II y IV, que se estaban usando en los morteros. El resultado de los ensayos reflejaba que el uso de cemento tipo IV no producía elongaciones mensurables en las probetas, mientras que las realizadas con cemento tipo II desarrollaban elongaciones sensiblemente mayores de los límites establecidos por la norma para áridos no reactivos.

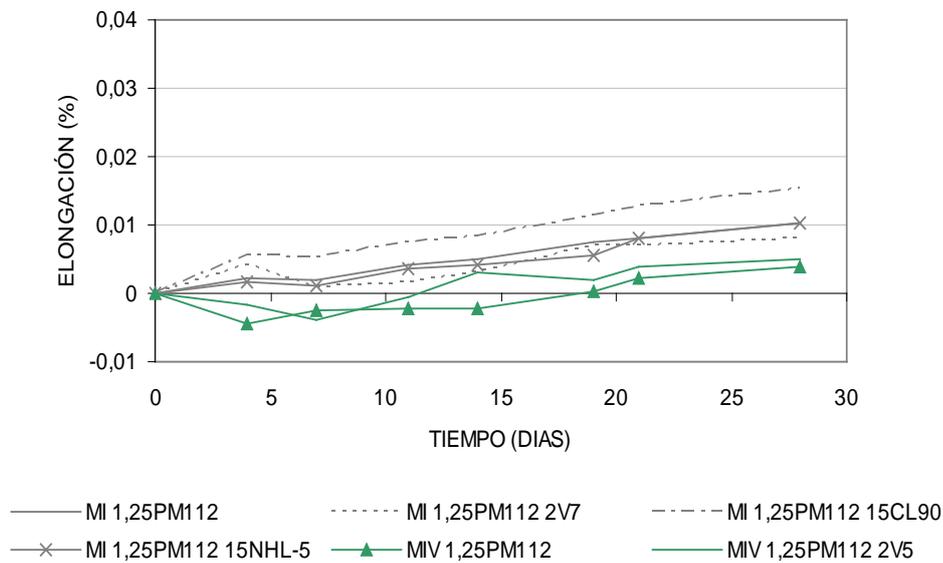


Figura 8.24. Gráfico elongación-tiempo del ensayo de reactividad álcali-silíce y álcali-silicato por el método acelerado en probetas de mortero

El ensayo llevado a cabo a los morteros en este capítulo se realiza sobre las dosificaciones optimizadas que se están caracterizando. Así, las modificaciones en cuanto a lo establecido por la norma son varias. En primer lugar, como en el capítulo 6, el cemento utilizado en el ensayo no es el tipo I sino el tipo IV, incluido en todas las dosificaciones. En segundo lugar, se usa una relación cemento:árido de 1:6 y no de 1:2,25; como establece la norma. En tercer lugar, la relación agua:cemento utilizada en los morteros es la necesaria para obtener una consistencia normal, mientras que la norma indica que la cantidad de agua de amasado será la suficiente para obtener una consistencia entre 105 y 120 mm en la mesa de sacudidas. En cuarto lugar, las granulometrías de los áridos del mortero de la norma y de los morteros diseñados son, también, distintas. Por último, la norma no observa la presencia de aditivos en los morteros de ensayo.

Teniendo en cuenta todas estas modificaciones, lo esperado sería un comportamiento mejor de las dosificaciones ensayadas en este capítulo que el de las dosificaciones probadas en el capítulo 6, sobre todo atendiendo a la diferencia en la cantidad de cemento usado en unas y otras, lo que modifica de forma importante la concentración de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ , ingrediente fundamental para el desarrollo de la reactividad árido-álcali.

Efectivamente, los resultados del ensayo acelerado en probetas de mortero, realizado con las modificaciones comentadas, son mejores en los morteros mejorados que en los morteros realizados según la norma, con la variación del tipo de cemento. Esto se puede comprobar en el gráfico de la Figura 8.25,

en el que se añaden las elongaciones de los morteros con cemento tipo IV a las elongaciones de los morteros caracterizados en el presente capítulo, incluidas en el gráfico de la Figura 8.24. Estas elongaciones, en trazo grueso violeta o verde, según la pizarra de la que están hechas, son mayores que las de los morteros mejorados realizados con la pizarra correspondiente, PIZ 1 o PIZ 4.

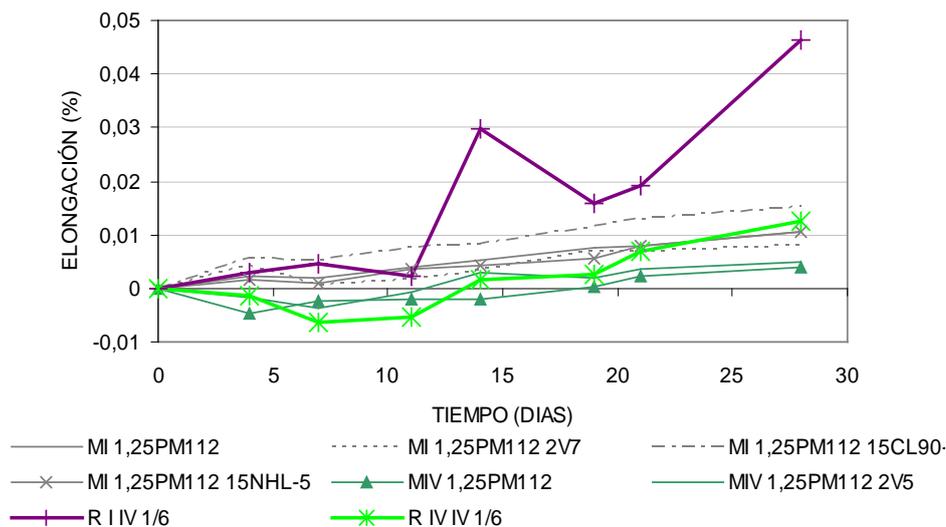


Figura 8.25. Gráfico elongación-tiempo del ensayo de reactividad álcali-sílice y álcali-silicato por el método acelerado en probetas de mortero. Se incluyen morteros ensayados en el capítulo 5

En todo caso, las elongaciones que se están comparando están todas muy por debajo del límite de 0,1%, considerado por la norma.

Con estos resultados se puede concluir que los morteros mejorados no presentan indicios de desarrollar reactividad entre los álcalis del cemento y las pizarras utilizadas como áridos. La inclusión de aditivos no produce ningún efecto negativo en cuanto a estos comportamientos.

## **Capítulo 9: Valoración económica de los morteros seleccionados**

---



## **9.1. Introducción**

En los capítulos precedentes se expone el proceso de creación de dosificaciones de mortero para el aprovechamiento de residuos de la industria extractiva de la pizarra. Los morteros resultantes resuelven las dificultades técnicas que el árido presenta y muestran unas características semejantes, y en muchos casos mejores, a las de los morteros que se comercializan en la actualidad.

En este capítulo se pretende realizar una estimación de los costes de producción de los productos finales para completar, así, el estudio de las posibilidades reales de valorización de los residuos de pizarra para la fabricación de morteros de cemento.

## **9.2. Costes de las materias primas de los morteros**

Los costes de los materiales que componen cada dosificación se calculan, a continuación, en base a precios estimados facilitados por agentes comerciales de las materias primas o por almacenes intermediarios que suministran dichos productos.

Para los cálculos se supone coste cero para las pizarras que se utilizan como áridos, ya que se recogen de escombreras situadas en terrenos naturales en las proximidades de las explotaciones y su eliminación supone un importante beneficio medioambiental para la recuperación de las zonas degradadas.

Se introduce la variante del transporte del cemento puesto que la fabricación de los morteros se debería llevar a cabo en las inmediaciones de las mencionadas escombreras para minimizar los costes de transporte de la pizarra. Costes que serían muy elevados por las enormes cantidades de material a desplazar. El transporte del cemento modifica de forma importante el precio de éste y, por consiguiente, el del producto final.

En las Figuras 9.1 a 9.6 se incluyen los precios estimados por tonelada de los morteros seleccionados en esta Tesis Doctoral.

PRODUCTO	€/kg	CANTIDAD (kg)	€/t	MI 1,25PM112 €/t
CEM IV (hasta 50 km)	0,076	143	10,87	Hasta 50 km <b>12,01</b>
CEM IV (hasta 100 km)	0,079	143	11,30	Hasta 100 km <b>12,44</b>
CEM IV (hasta 150 km)	0,082	143	11,73	Hasta 150 km <b>12,87</b>
CEM IV (hasta 200 km)	0,084	143	12,01	Hasta 200 km <b>13,16</b>
CEM IV (hasta 300 km)	0,089	143	12,73	Hasta 300 km <b>13,87</b>
PREMORTER MIX 112	0,635	1,8	1,14	
VINNAPAS 7031H	3,000	0	0,00	
VINNAPAS 5010N	2,000	0	0,00	
CL90-S	0,074	0	0,00	
NHL-5	0,300	0	0,00	

Figura 9.1. Costes de materias primas por tonelada de mortero MI 1,25PM112

PRODUCTO	€/kg	CANTIDAD (kg)	€/t	MI 1,25PM112 2,0V7031H €/t
CEM IV (hasta 50 km)	0,076	143	10,87	Hasta 50 km <b>20,71</b>
CEM IV (hasta 100 km)	0,079	143	11,30	Hasta 100 km <b>21,14</b>
CEM IV (hasta 150 km)	0,082	143	11,73	Hasta 150 km <b>21,57</b>
CEM IV (hasta 200 km)	0,084	143	12,01	Hasta 200 km <b>21,86</b>
CEM IV (hasta 300 km)	0,089	143	12,73	Hasta 300 km <b>22,57</b>
PREMORTER MIX 112	0,635	1,8	1,14	
VINNAPAS 7031H	3,000	2,9	8,70	
VINNAPAS 5010N	2,000	0	0,00	
CL90-S	0,074	0	0,00	
NHL-5	0,300	0	0,00	

Figura 9.2. Costes de materias primas por tonelada de mortero MI 1,25PM112 2,0V7031H

PRODUCTO	€/kg	CANTIDAD (kg)	€/t	MI 1,25PM112 15CL90-S €/t
CEM IV (hasta 50 km)	0,076	143	10,87	Hasta 50 km <b>13,60</b>
CEM IV (hasta 100 km)	0,079	143	11,30	Hasta 100 km <b>14,03</b>
CEM IV (hasta 150 km)	0,082	143	11,73	Hasta 150 km <b>14,46</b>
CEM IV (hasta 200 km)	0,084	143	12,01	Hasta 200 km <b>14,75</b>
CEM IV (hasta 300 km)	0,089	143	12,73	Hasta 300 km <b>15,46</b>
PREMORTER MIX 112	0,635	1,8	1,14	
VINNAPAS 7031H	3,000	0	0,00	
VINNAPAS 5010N	2,000	0	0,00	
CL90-S	0,074	21,5	1,59	
NHL-5	0,300	0	0,00	

Figura 9.3. Costes de materias primas por tonelada de mortero MI 1,25PM112 15CL90-S

PRODUCTO	€/kg	CANTIDAD (kg)	€/t	MI 1,25PM112 15NHL-5 €/t
CEM IV (hasta 50 km)	0,076	143	10,87	Hasta 50 km <b>18,46</b>
CEM IV (hasta 100 km)	0,079	143	11,30	Hasta 100 km <b>18,89</b>
CEM IV (hasta 150 km)	0,082	143	11,73	Hasta 150 km <b>19,32</b>
CEM IV (hasta 200 km)	0,084	143	12,01	Hasta 200 km <b>19,61</b>
CEM IV (hasta 300 km)	0,089	143	12,73	Hasta 300 km <b>20,32</b>
PREMORTER MIX 112	0,635	1,8	1,14	
VINNAPAS 7031H	3,000	0	0,00	
VINNAPAS 5010N	2,000	0	0,00	
CL90-S	0,074	0	0,00	
NHL-5	0,300	21,5	6,45	

Figura 9.4. Costes de materias primas por tonelada de mortero MI 1,25PM112 15NHL-5

PRODUCTO	€/kg	CANTIDAD (kg)	€/t	MIV 1,25PM112 €/t
CEM IV (hasta 50 km)	0,076	143	10,87	Hasta 50 km <b>12,01</b>
CEM IV (hasta 100 km)	0,079	143	11,30	Hasta 100 km <b>12,44</b>
CEM IV (hasta 150 km)	0,082	143	11,73	Hasta 150 km <b>12,87</b>
CEM IV (hasta 200 km)	0,084	143	12,01	Hasta 200 km <b>13,16</b>
CEM IV (hasta 300 km)	0,089	143	12,73	Hasta 300 km <b>13,87</b>
PREMORTER MIX 112	0,635	1,8	1,14	
VINNAPAS 7031H	3,000	0	0,00	
VINNAPAS 5010N	2,000	0	0,00	
CL90-S	0,074	0	0,00	
NHL-5	0,300	0	0,00	

Figura 9.5. Costes de materias primas por tonelada de mortero MIV 1,25PM112

PRODUCTO	€/kg	CANTIDAD (kg)	€/t	MIV 1,25PM112 2,0V5010N €/t
CEM IV (hasta 50 km)	0,076	143	10,87	Hasta 50 km <b>17,81</b>
CEM IV (hasta 100 km)	0,079	143	11,30	Hasta 100 km <b>18,24</b>
CEM IV (hasta 150 km)	0,082	143	11,73	Hasta 150 km <b>18,67</b>
CEM IV (hasta 200 km)	0,084	143	12,01	Hasta 200 km <b>18,96</b>
CEM IV (hasta 300 km)	0,089	143	12,73	Hasta 300 km <b>19,67</b>
PREMORTER MIX 112	0,635	1,8	1,14	
VINNAPAS 7031H	3,000	0	0,00	
VINNAPAS 5010N	2,000	2,9	5,80	
CL90-S	0,074	0	0,00	
NHL-5	0,300	0	0,00	

Figura 9.6. Costes de materias primas por tonelada de mortero MIV 1.25PM112 2.0V50

### 9.3. Estimación de costes de producción de los morteros

A continuación, se presenta un cálculo estimado de los costes totales de producción de los morteros de pizarra estableciendo unas premisas iniciales. Se trata de evaluar cual sería el umbral de rentabilidad de los morteros estudiados, esto es, el precio mínimo al que se deberían comercializar dichos morteros para comenzar a recoger beneficios de su venta. Estos valores son un indicativo de la viabilidad y las posibilidades que tendría la fabricación de morteros con residuos de la industria extractiva de la pizarra como actividad económica rentable y sostenible por sí misma.

Para este cálculo se van a tener en cuenta los supuestos siguientes:

- Se valora la creación de una planta para la fabricación de los morteros estimando una producción total anual de 100.000 toneladas. Esta planta debe incluir el machaqueo y clasificación por tamaños de las pizarras, así como la fabricación de los morteros secos y la instalación para su expedición en sacos o a granel. Se supondrá una amortización de estas instalaciones a 10 años.
- Para el correcto funcionamiento de la planta se estima que se requerirán 4 trabajadores, 1 encargado y 3 empleados.
- Se incluirán los gastos energéticos, cuantiosos en este tipo de industria.
- No se valora la posible adquisición de terreno para ubicar las instalaciones, ya que la variedad de posibilidades y precios es muy amplia. Debido al beneficio medioambiental que se conseguiría con esta actividad en la zona, se debería estudiar la posibilidad de emplazar las instalaciones en suelo público.

Para proceder a estimar económicamente estos parámetros se aplican precios estimados obtenidos de distintas fuentes. En algunos casos estos precios no están actualizados debido a que no se han encontrado datos posteriores a los aquí presentados. En todo caso se pretende una aproximación realista de los costes de producción y no un estudio pormenorizado de dichos costes.

En la Figura 9.7 se incluyen los datos referentes a las plantas de tratamiento de áridos y de fabricación de mortero. El precio estimado de la planta de tratamiento ha sido proporcionado por el departamento comercial de la empresa Maquinaria de Canteras Trimán, S.A.U., y corresponde a una planta de triturado y clasificación de áridos con una producción máxima de 300 t/h.

En el caso de la planta de mortero, se toma como valor el que refleja la agencia EFE en una información del 11 de abril de 2006, aparecida en la página web Invertia.com, sobre la inversión, del grupo empresarial GLA, de 6

millones de euros en una planta de mortero seco, con capacidad de producción de 200.000 toneladas anuales, en Ciudad Real.

Para calcular los gastos de amortización a 10 años se aplica un interés fijo del 6%, en base a los datos del Instituto de Crédito oficial sobre préstamos y créditos para empresas y emprendedores del 2014.

CONCEPTO	COSTE (€)
PLANTA DE TRATAMIENTO DE ÁRIDOS	2.000.000
PLANTA DE MORTERO	6.000.000
AMORTIZACIÓN (6% a 10 años)	2.640.000
<b>COSTE ANUAL INSTALACIONES (10 años) (€)</b>	<b>1.064.000</b>

Figura 9.7. Costes de instalaciones y amortización

Los costes de los salarios de los empleados necesarios para desarrollar la actividad se estiman teniendo en cuenta los datos de la nota de prensa, publicada en la página web del Instituto Nacional de Estadística, que lleva por título “Decil de salarios del empleo principal. Encuesta de Población Activa (EPA). Año 2013”. El coste de Seguridad Social de los empleados a las empresas fue, en el 2013, del 30% distribuido en 23,6% para contingencias comunes, 5,5% como tipo general por desempleo para un contrato indefinido, 0,2% para el fondo de garantía salarial y 0,70% en concepto de formación profesional.

Con estos datos se calculan los costes salariales reflejados en la tabla de la Figura 9.8.

CONCEPTO	COSTE (€)
JEFE DE PLANTA	42.000
EMPLEADOS (3X25.200)	75.600
SEGURIDAD SOCIAL	35.280
<b>COSTE ANUAL SALARIOS (€)</b>	<b>152.880</b>

Figura 9.8. Costes de salarios

Por último, se procede a la estimación de los gastos energéticos. Para ello se van a considerar los consumos de electricidad y combustible incluidos en el informe titulado “Declaración Medioambiental 2005. Fábrica el Alto”. Este

informe incluye datos de producción de la planta de mortero que forma parte del complejo de "El Alto", que el grupo Cementos Portland Valderrivas tiene instalado en el término municipal de Morata de Tajuña, Madrid.

En el año 2005, la planta de mortero de El Alto produjo 121.885 toneladas de mortero seco, con un consumo de electricidad de 6,1 kWh por tonelada de mortero fabricada y un consumo de gasoil de 3,4 kg por tonelada de arena húmeda que entra en el secadero. Se van a utilizar estos parámetros para el cálculo de consumos energéticos para la producción de 100.000 toneladas de mortero anuales, aun suponiendo que los avances de la ingeniería habrán mejorado la eficacia de los procesos durante el transcurso de los años hasta la actualidad.

El precio de combustible se estima como la media de los valores del año 2014 y se ha obtenido de los boletines que realiza el Observatorio de Mercado para la Energía para la Comisión Europea y que se pueden consultar en la página web de esta. Se toma un valor medio de 0,9 €/L.

El coste de la energía eléctrica se establece tomando como referencia la última revisión de tarifas de último recurso publicada en el B.O.E. el 1 de febrero de 2014. Así se va a aplicar un precio de 42,04 €/kW y año de término de potencia y 0,12 kWh de término de energía sin discriminación horaria.

Los costes energéticos calculados se presentan en la tabla de la Figura 9.9.

CONCEPTO		COSTE (€)
POTENCIA INSTALADA	42,04 €/kW y año	30.689
Tratamiento áridos	530 kW	
Planta mortero	200 kW	
<b>ENERGÍA CONSUMIDA</b>		91.389
Tratamiento 85.714 t arena	151.580 kWh	
Fabricación 100.000 t mortero	610.000 kWh	
<b>COSTE ANUAL ELECTRICIDAD (€)</b>		<b>122.078</b>
CONCEPTO		COSTE (€)
GASOIL	0,9 €/L	316.285
Secado 85.714 t arena	4,1 L/t	
<b>COSTE ANUAL COMBUSTIBLE (€)</b>		<b>316.285</b>
<b>COSTE ANUAL ENERGÉTICO (€)</b>		<b>438.363</b>

Figura 9.9. Costes energéticos para la fabricación de 100.000 T de mortero

Se debe tener en cuenta que los precios de los recursos energéticos son muy cambiantes por lo que los costes energéticos calculados pueden llegar a variar notablemente en pequeños márgenes de tiempo.

Sumando todos los costes anuales y dividiéndolos entre las 100.000 toneladas de producción anual estimada se obtiene el valor del coste de producción por tonelada de mortero, que se añadirá al coste en materias primas, calculado previamente en este capítulo. La suma de ambos costes será el umbral de rentabilidad buscado, que será diferente para cada tipo de mortero.

<b>COSTE ANUAL INSTALACIONES</b>	<b>(10 años) (€)</b>	<b>1.064.000</b>
<b>COSTE ANUAL SALARIOS</b>	<b>(€)</b>	<b>152.880</b>
<b>COSTE ANUAL ENERGÉTICO</b>	<b>(€)</b>	<b>438.363</b>
<b>COSTE DE PRODUCCIÓN POR TONELADA</b>	<b>(€)</b>	<b>16,55</b>

Figura 9.10. Coste de producción por tonelada de mortero

Los umbrales de rentabilidad para los distintos morteros, teniendo en cuenta las distancias entre la cementera y la planta de mortero, se incluyen en la tabla de la Figura 9.11.

Valoración económica de los morteros seleccionados

<b>MI 1,25PM112</b> €/t	
Hasta 50 km	<b>28,56</b>
Hasta 100 km	<b>28,99</b>
Hasta 150 km	<b>29,42</b>
Hasta 200 km	<b>29,71</b>
Hasta 300 km	<b>30,41</b>

<b>MI 1,25PM112 2,0V7031H</b> €/t	
Hasta 50 km	<b>37,26</b>
Hasta 100 km	<b>37,69</b>
Hasta 150 km	<b>38,12</b>
Hasta 200 km	<b>38,41</b>
Hasta 300 km	<b>39,12</b>

<b>MI 1,25PM112 15CL90-S</b> €/t	
Hasta 50 km	<b>30,15</b>
Hasta 100 km	<b>30,58</b>
Hasta 150 km	<b>31,01</b>
Hasta 200 km	<b>31,30</b>
Hasta 300 km	<b>32,01</b>

<b>MI 1,25PM112 15NHL-5</b> €/t	
Hasta 50 km	<b>35,01</b>
Hasta 100 km	<b>35,44</b>
Hasta 150 km	<b>35,87</b>
Hasta 200 km	<b>36,16</b>
Hasta 300 km	<b>36,87</b>

<b>MIV 1,25PM112</b> €/t	
Hasta 50 km	<b>28,56</b>
Hasta 100 km	<b>28,99</b>
Hasta 150 km	<b>29,42</b>
Hasta 200 km	<b>29,71</b>
Hasta 300 km	<b>30,42</b>

<b>MIV 1,25PM112 2,0V5010N</b> €/t	
Hasta 50 km	<b>34,36</b>
Hasta 100 km	<b>34,79</b>
Hasta 150 km	<b>35,22</b>
Hasta 200 km	<b>35,51</b>
Hasta 300 km	<b>36,22</b>

Figura 9.11. Umbrales de rentabilidad para las dosificaciones de mortero



## **Capítulo 10: Conclusiones y futuras líneas de investigación**

---



## 10.1. Conclusiones

La investigación realizada ha generado gran cantidad de información y resultados que se pueden resumir en las siguientes conclusiones:

1. Las pizarras, una vez procesadas, permiten conseguir arenas de características aceptables para la fabricación de morteros, cumpliendo correctamente con las exigencias de la normativa aplicable excepto en lo que se refiere a la reactividad álcali-sílice.
2. El estudio de la reactividad de las pizarras con los álcalis del cemento muestra que la utilización de cementos con adiciones, en concreto cenizas volantes, arroja resultados positivos en el tratamiento de dicha reactividad. El empleo de cementos de bajo contenido en álcalis o de aditivos de litio, soluciones que se muestran válidas en otros tipos de áridos silíceos, no resultan eficaces con las pizarras.
3. Los morteros iniciales, fabricados con cemento y árido de pizarra y sin aditivos, adquieren propiedades mecánicas aceptables pero son materiales densos, que requieren una elevada cantidad de agua de amasado que retienen con dificultad. Presentan períodos de trabajabilidad cortos, alta absorción de agua por capilaridad y una durabilidad comprometida.
4. La inclusión de aditivos modifica de forma importante el comportamiento y propiedades de los morteros de pizarra mejorando notablemente las características de estos materiales.  
Cabe destacar el papel de los plastificantes-aireantes, que permiten rebajar la relación agua/cemento de las mezclas, al mismo tiempo que favorecen la trabajabilidad de los morteros incluyendo aire en el material, disminuyendo su densidad y aumentando el período de tiempo en que los morteros frescos se pueden emplear.
5. Con la combinación de aditivos se consiguen mejorar características del mortero de pizarra que amplían su versatilidad, de manera que se consiguen distintos tipos de morteros, adecuados a distintos usos en obra.
6. Las cales aportan movilidad a los morteros frescos sin incrementar de forma importante la consistencia de los mismos, lo que redundará en una mayor facilidad en el manejo de las mezclas para su aplicación.

7. En cuanto a su durabilidad, los morteros de pizarra aditivados presentan buen comportamiento frente a los diferentes ambientes agresivos a los que se pueden ver expuestos durante su vida útil.
8. Salvadas las dificultades que presentan las pizarras y con los medios adecuados se consiguen morteros de albañilería y de revoco y enlucido con características de calidad equiparables a los productos que se encuentran actualmente en el mercado.
9. Los morteros fabricados con residuos de pizarra serían materiales competitivos también en lo que a costes de fabricación se refiere, con unos umbrales de rentabilidad bajos, lo que los hace realmente atractivos para su posible fabricación y salida al mercado.
10. Se concluye que la fabricación de morteros es una vía factible para la valorización de los residuos de la industria extractiva de la pizarra, de manera que se contribuiría a su eliminación mediante la introducción de un producto nuevo del que se obtendría un beneficio económico. Eliminación del residuo con beneficio económico son dos aspectos fundamentales para que un proyecto de este tipo pueda ser llevado a la realidad.

## 10.2. Futuras líneas de investigación

En el transcurso de la investigación de esta Tesis Doctoral aparecen nuevas posibilidades, interrogantes, comportamientos difíciles de explicar, que merecerían una inmersión profunda para su mejor conocimiento y desarrollo. El estudio de estos fenómenos es difícilmente abarcable para un solo trabajo y, a menudo, distraen la atención hacia el objetivo central marcado por el investigador.

Pero en muchos casos estas nuevas posibilidades e ideas, que aparecen en el transcurso de la investigación de una tesis, son el germen para futuros trabajos, posibilitando el avance en la generación de conocimiento científico.

En esta Tesis se proponen las siguientes líneas de investigación para aumentar los conocimientos sobre las posibilidades de usos de los residuos de pizarra en hormigones y morteros:

1. La búsqueda de nuevas vías para evitar la reactividad de las pizarras frente a los álcalis del cemento, de manera que se puedan utilizar cementos de distintas características que posibiliten, por ejemplo, el

empleo de residuos de pizarra en la fabricación en cadena de piezas prefabricadas.

2. El desarrollo de nuevos materiales que incorporen pizarra, morteros con pizarra, tales como morteros cola, morteros de revestimiento (monocapa), morteros para soleras, etc.
3. El estudio de las posibilidades de inclusión de la pizarra en el hormigón, como árido fino o grueso, con las debidas garantías de resistencia y durabilidad. Verificando la idoneidad de los distintos sistemas de machacado de la roca, así como la incidencia de la reactividad que muestra la pizarra y las características de los hormigones diseñados.



## **Bibliografía**

---



- <sup>132</sup> Adamopoulou, E., Pipilikaki, P., Katsiotis, M.S., Chaniotakis, M., Katsioti, M. How sulfates and increased temperature affect delayed ettringite formation (DEF) in white cement mortars. *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 3583–3590.
- <sup>82</sup> Ahmadi, B., Shekarchi, M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*. 32 (2) (2010): 134-141.
- <sup>111</sup> ASTM C295/C295M-12 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/C0295\_C0295-12.
- <sup>27</sup> Barluenga, G., Hernandez-Olivares, F. Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste. *Construction and Building Materials*. 24 (9) (2010): 1601-1607.
- <sup>14</sup> Barreiros, F. M., Vieira, M. T. Powder injection moulding to recover slate wastes. *Key Engineering Materials*. 230-232 (2002): 247-250.
- <sup>59</sup> Bektas, F., Turanli, L., Topal, T., Goncuoglu, Mc. Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate calcium fly-ash. *Cement and Concrete Research*. 34 (2004) 2209–2214.
- <sup>126</sup> Berube, M. A., Durand, B., Vezina, D., Fournier, B. Alkali-aggregate reactivity in Quebec (Canada). *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27 (2000):226–245.
- <sup>53</sup> Bérube, MA., Duchesne, J., Dorion, JF., Rivest, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*. 32(8) (2002): 1215-1227.
- <sup>107</sup> Binal, A. The determination of gel swelling pressure of reactive aggregates by ASGPM device and a new reactive-innocuous aggregate decision chart. *Construction and Building Materials*. 22 (2008) 1–13.
- <sup>47</sup> Blackwell, B.Q., Pettifer, K. Alkali-reactivity of greywacke aggregates in Maentwrog Dam (North Wales). *Magazine of Concrete Research*. 44 (161) (1992) 255–264.
- <sup>41</sup> Bleszynski, R.F., Thomas, M.D.A. Microstructural studies of alkali–silica reaction in Fly-ash Concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*. 7 (1998) 766–778.
- <sup>56</sup> Bleszynski, R.F., Thomas, M.D.A. Microstructural studies of alkali–silica reaction in Fly-ash Concrete immersed in alkaline solutions. *Advanced Cement Based Materials*. 7 (1998) 766–778.
- <sup>130</sup> Brown, P.W., Bothe, J.V. The stability of ettringite, *Advanced Cement Research*. 5 (18) (1993) 47–63.
- <sup>13</sup> Butler, A. K., Leek, D. S., Johnson, R. A. The potential for using some alternative aggregates in structural concrete. *Structural Engineer*. 78(22) (2000): 22-25.

- <sup>16</sup> Campos, M., Velasco, F., Martínez, M. A., Torralba, J. M. Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 24 (5) (2004): 811-819.
- <sup>63</sup> Carles-Gibergues, A., Cyr, M., Moisson, M., Ringot, E. A simple way to mitigate alkali-silica reaction. *Materials and Structures*. 4 (2008):73–83.
- <sup>15</sup> Catarino, L., Sousa, J., Martins, I. M., Vieira, M. T., Oliveira, M. M. Ceramic products obtained from rock wastes. *Journal of Materials Processing Technology*. 143-144 (1) (2003): 843-845.
- <sup>78</sup> Collins, C., Ideker, J., Willis, G., Kurtis, K. Examination of the effects of LiOH, LiCl, and LiNO<sub>3</sub> on ASR. *Cement and Concrete Research*. 34 (2004): 1403-1415.
- <sup>52</sup> Constantiner, D., Diamond, S. Alkali release from feldspars into pore solutions. *Cement and Concrete Research*. 33(4) (2003): 549–554.
- <sup>65</sup> Cyr, M., Carles-Gibergues, A., Moisson, M., Ringot, E. Mechanism of ASR reduction by reactive aggregate powders. *Advances in Cement Research*. 21 (4) (2009) 147-158.
- <sup>64</sup> Cyr, M., Rivard, P., Labrecque, F. Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 31 (7) (2009): 438-446.
- <sup>32</sup> Dent Glasser, L.S., Kataoka, N. "The chemistry of alkali-aggregate reaction". *Cement and Concrete Research*. 11(1981), 1-9.
- <sup>127</sup> Diamond, S. Delayed ettringite formation - Processes and problems. *Cement and Concrete Composites*. 18 (1996): 205-215.
- <sup>133</sup> Diamond, S. Proc. 6th Int. Conf. on AAR in Concrete, Copenhagen, Denmark, 155, (1983).
- 80 Diamond, S. Unique response of LiNO<sub>3</sub> as an alkali silica reaction preventive admixture. *Cement and Concrete Research*. 29 (1999) 1271.
- <sup>72</sup> Diamond, S., Ong, S. The mechanisms of lithium effects on ASR. *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction*. Concrete Society of U.K., (London) (1992), p. 269.
- <sup>10</sup> Diario de León.es. El plan integral para residuos de pizarra enfrenta al PSOE y al PP. Disponible en Web: < [http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/plan-integral-residuos-pizarra-enfrenta-psoe-pp\\_585497.html](http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/plan-integral-residuos-pizarra-enfrenta-psoe-pp_585497.html)>. Febrero de 2011.
- <sup>3</sup> Diario de León.es. La pizarra sobrevivirá si logra reciclar tres millones de toneladas de residuos. Disponible en Web: <[http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/pizarra-sobrevivira-si-logra-reciclar-tres-millones-toneladas-residuos\\_559805.html](http://www.diariodeleon.es/noticias/bierzo/pizarra-sobrevivira-si-logra-reciclar-tres-millones-toneladas-residuos_559805.html)>. Octubre de 2010.
- <sup>26</sup> Ding, Y., Jalali, S., Niederegger, C. Recycling of metamorphic rock waste in ecological cement. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*. 163 (3) (2010): 143-148.

- <sup>112</sup> Documento Básico SE-F “Seguridad Estructural: Fábrica. Código Técnico de la Edificación. R.D. 314/2006, de 17 de marzo. Ministerio de Fomento (2006).
- <sup>43</sup> Dolar-Mantuani, L.M.M. Undulatory extinction in quartz used for indentifying potentially alkali-reactive rocks, in: R.E. Oberholster (Ed.), Proc. of the 5th Int. Conf. on AAR in Concrete, Cape Town, 1981, pp. 1–12.
- <sup>38</sup> Dron, R., Brivot, F. Thermodynamic and kinetic approach to the alkalisilica reaction. Part 2: Experiment. Cement and Concrete Research. 22 (1992) 941–948, 23 (1993) 93–103.
- <sup>121</sup> Duchesne, J., Bérubé, M.A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanisms. Part 2: Pore solution chemistry. Cement and Concrete Research. Vol. 24, No. 2 (1994) pp. 221-230.
- <sup>12</sup> Eden, N. B., Manthorpe, A. R., Miell, S. A., Szymanek, P. H., Watson, K. L. Autoclaved aerated concrete from slate waste Part 1: Some property/density relationships. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. 2 (2) (1980): 95-100.
- <sup>117</sup> EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento, 4ª edición (2010).
- <sup>129</sup> Ekolu, S.O., Thomas, M.D.A., Hooton, R.D. Implications of pre-formed microcracking in relation to the theories of DEF mechanism. Cement and Concrete Research. 37 (2007) 161–165.
- <sup>1</sup> El País digital. Las pizarreras acumulan cada año 18 millones de toneladas de residuos. Disponible en Web: <<http://elpais.com/diario/2011/03/05/galicia/>>. Marzo de 2011.
- <sup>8</sup> España. Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015. Boletín Oficial del Estado, 26 de febrero de 2009, Núm. 49, Sec. I, Pág. 19893-20016.
- <sup>6</sup> España. Real Decreto 2994/82, de 15 de octubre, sobre la restauración del espacio natural afectado por actividades mineras. Boletín Oficial del Estado, 15 de noviembre de 1982, núm. 274, p. 31246-31247.
- <sup>4</sup> Estadística Minera de España 2012. Dirección Gral. de Política Energética y Minas. Secretaría de Estado de Energía. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Disponible en Web: <<http://www.minetur.gob.es/energia/mineria/Estadistica/Datos%20anuales/anual%202012.pdf>>
- <sup>69</sup> Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Balcom, B. J., Folliard, K. J. Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. Cement and Concrete Research. 35 (9) (2005): 1789-1796.
- <sup>76</sup> Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Folliard, K. J., Fournier, B. Summary of research on the effect of LiNO<sub>3</sub> on alkali silica reaction in new concrete. Cement and Concrete Research. 40 (4) (2010): 636-642.

- <sup>30</sup> Fernandes, I., Noronha, F., Teles, M. Examination of the concrete from an old Portuguese dam: Texture and composition of alkali–silica gel. *Materials Characterization*. 58 (2007) 1160–1170.
- <sup>139</sup> Fernández Cánovas, M., Hormigón (10ª ed). Ibergarceta Publicaciones, S.L., Madrid (2013).
- <sup>34</sup> Fournier, B., Bérubé, M.-A. Alkali–aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27 (2000) 167–191.
- <sup>119</sup> Fournier, B., Chevrier, R., de Grosbois, M., Lisella, R., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M., Thomas, M., Baxter, S. The accelerated concrete prism test (60 °C): variability of the test method and proposed expansion limits. *Proc. 12th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China*. 1 (2004):314–323.
- <sup>125</sup> Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C., Chevrier, R. Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali–silica reaction in concrete, in: Tang Mingshu, Deng Min (Eds.), *Proc. 12th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, vol. 1, International Academic Publishers/World Publishing Corporation, Beijing, 2004.
- <sup>28</sup> Frías, M., de la Villa, R. V., Garcia, R., de Rojas, M. I. S., Valdes, A. J. The Influence of Slate Waste Activation Conditions on Mineralogical Changes and Pozzolanic Behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. 96 (7) (2013): 2276-2282.
- <sup>9</sup> Galicia. Resolución de 21 de noviembre de 2001 por la que se acuerda hacer público el Plan de Gestión de Residuos Industriales y Suelos Contaminados de Galicia. *Diario Oficial de Galicia*, 18 de diciembre de 2001, Núm. 243, Pág. 16.082.
- <sup>135</sup> Garbalinska, H., A Wygocka, A., Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance. *Construcción and Building Materials*. 51 (2014): 258-266.
- <sup>61</sup> García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A. Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 175–183.
- <sup>33</sup> Glasser, F.P. Chemistry of the alkali–aggregate reaction, in: R.N. Swamy (Ed.). *The Alkali Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Son Ltd., Glasgow, UK, 1992, pp. 30–53.
- <sup>42</sup> Gogte, B.S. An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali–aggregate reactions. *Engineering Geology*. 7 (1973) 135–153.
- <sup>39</sup> Goltermann, P. Mechanical prediction of concrete deterioration—part 2: classification of crack patterns. *Aci Materials Journal*. 92 (1995) 1–6.
- <sup>44</sup> Grattan-Bellew, P.E. Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali–silica reaction, in: A.B. Poole (Ed.), *Proc. of the 9th Int. Conf. on AAR in Concrete*, London, vol. 1, 1992, pp. 383–394.

- <sup>31</sup> Herrador, M. F., Martínez-Abella, F., Rabuñal Dopico, J. R. Experimental evaluation of expansive behavior of an old-aged ASR-affected dam concrete: methodology and application. *Materials and Structures*. (2008) 41:173–188.
- <sup>60</sup> Hester, D., McNally, C., Richardson, M. A study of the influence of slag alkali level on the alkali–silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*. 19 (2005) 661–665.
- <sup>136</sup> Huang, H., Ye, G., Damidot, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*. 52 (2013) p 71-81.
- <sup>51</sup> Hüngrer, Klaus-Jürgen. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 1193–1205.
- <sup>36</sup> Ichikawa, T., Miura, M. Modified model of alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 1291–1297.
- <sup>66</sup> Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*. 24 (7) (2010) 1309-1312.
- <sup>40</sup> Idorn, G.M. A discussion of the paper “Mathematical model for kinetics of alkali–silica reaction in concrete” by Zdeněk P. Bažant and Alexander Steffens. *Cement and Concrete Research*. 31 (2001) 1109–1110 (and references therein).
- <sup>138</sup> Ince, C., Ozturk, Y., Carter, M.A. et ál. The influence of supplementary cementing material son water retaining characteristics of hydrated lime and cement mortars in masonry construction. *Materials and Structures*. 47 (3) (2014): p 493-501.
- <sup>113</sup> Instrucción para la recepción de cementos (RC-08). R.D. 956/2008, de 6 de junio. Ministerio de Fomento (2008).
- <sup>83</sup> Karakurt, C., Topcu, I. B. Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. *Construction and Building Materials*. 25 (4) (2011): 1789-1795.
- <sup>74</sup> Kawamura, M., Fuwa, H. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. *Cement and Concrete Research*. 33 (2003): 913-919.
- <sup>48</sup> Kerrick, D.M., Hooton, R.D. ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: Results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests. *Cement and Concrete Research*. 22 (1992) 949–960.
- <sup>79</sup> Kurtis, K., Monteiro, P. Chemical additives to control expansion of ASR gel: proposed mechanisms of control. *Journal of Materials Science*. 38 (2003) 2027.
- <sup>70</sup> Lawrence, M., Vivian, H. H. The reactions of various alkalis with silica. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 12, (1961) p. 96.

- <sup>131</sup> Lee, H., Cody, R.D., Cody, A.M., Spry, P.G. The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 332–343.
- <sup>2</sup> Leonoticias.com. El futuro de la pizarra. Disponible en Web: <<http://www.leonoticias.com/frontend/leonoticias/El-Futuro-De-La-Pizarra-vn57543-vst208>>. 19/10/2010.
- <sup>55</sup> Lumley, J.S. The ASR expansion of concrete prisms made from cements partially replaced by ground granulated blastfurnace slag, Consultant to Blue Circle Industries PLC, Technical Centre, 305 London Road, Greenhithe, Kent, DA9 9JQ, UK. (1992).
- <sup>137</sup> Lv, Z., Chen, H. Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials. *Materials and Structures*. 11 (2013) p 1881-1892.
- <sup>29</sup> Marfil, S. A., Maiza, P. J. Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction: A petrographic study of three cases in Argentina. *Cement and Concrete Research*. 31 (2001) 1017–1021.
- <sup>62</sup> Martín de la Fuente, A. Determinación experimental de la reactividad química de áridos silicatados en matrices cementicias. Suficiencia investigadora. Universidad de Burgos, 2008.
- <sup>19</sup> Martins, I. M., Xavier, C., Mendonca, M. H., Oliveira, M. M. New ceramic products from slate and aluminium sludge wastes. *Advanced Materials Forum III, Pts 1 and 2*. Trans Tech Publications Ltd. Zurich-Uetikon. 514-516 (2006): 1695-1699.
- <sup>18</sup> Matins, I. M., Sousa, J., Catarino, L., Vieira, M. T., Oliveira, M. M. The formation of mullite from rock wastes containing alumina and silica. *Key Engineering Materials*. 230-232 (2002): 380-383.
- <sup>68</sup> McCoy, E. J., Caldwell, A.G. New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. *J. Am. Concr. Inst.* 22, (1951) p. 693.
- <sup>35</sup> Menéndez, E., Soriano, J. Procesos expansivos del hormigón: ensayos árido-álcali, ataque por sulfatos, hielo deshielo. *Sistemas de prevención y actuaciones*. (CEMCO), (2007).
- <sup>75</sup> Mitchell, L. D., Beaudoin, J. J., Grattan-Bellew, P. The effects of lithium hydroxide solution on alkali silica reaction gels created with opal. *Cement and Concrete Research*. 34 (4) (2004): 641-649.
- <sup>73</sup> Mo, X., Yu, C., Xu, Z. Long-term effectiveness and mechanism of LiOH in inhibiting ASR. *Cement and Concrete Research*., 33 (2003): 115-119.
- <sup>116</sup> NBE FL-90 «Muros resistentes de fábrica de ladrillo». R.D. 1723/1990, de 20 de diciembre. C.M. DGAV. Servicio de Normativa Técnica, Supervisión y Control (2004).

- <sup>134</sup> Neville, A.M. *Properties of Concrete* (4th ed.). Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, England (1995).
- <sup>92</sup> NF P 18-452, mai 1988 : Bétons – Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres.
- <sup>21</sup> Oliveira, F. A. C., Livramento, V., Delmas, F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes. I. Densification behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*. 196 (1-3) (2008): 101-108.
- <sup>22</sup> Oliveira, F. A. C., Livramento, V., Delmas, F. Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes. II: Mechanical behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*. 195 (1-3) (2008): 255-259.
- <sup>24</sup> Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Bai, J. Unfired clay masonry bricks incorporating slate waste. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*. 163 (1) (2010): 17-27.
- <sup>25</sup> Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Bai, J., Delpak, R., Snelson, D. G. Engineering properties of concrete made with slate waste. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*. 163 (3) (2010): 131-142.
- <sup>23</sup> Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Snelson, D. G., Bai, J. Applications of slate waste material in the UK. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*. 163 (1) (2010): 9-15.
- <sup>81</sup> Quanlina, N., Naiqian, F. Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 1784–1788.
- <sup>49</sup> Shayan, A. Alkali reactivity of deformed granitic rocks: a case study. *Cement and Concrete Research*. 23 (1993) 1229–1236.
- <sup>128</sup> Shayan, A., Ivanusec, I. An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Composites*. 18 (1996) 161-170.
- <sup>57</sup> Shehata, M.H., Thomas, M.D.A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. 30 (2000) 1063–1072.
- <sup>58</sup> Shehata, M.H., Thomas, M.D.A. Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*. 32 (2002) 341–349.
- <sup>124</sup> Shon, Chang-Seon., Zollinger, Dan G., Sarkar, Shondeep L. Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*. 32 (2002) 1981–1987.
- <sup>17</sup> Souza, L. P. D., Mansur, H. S. Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes. *Journal of Materials Processing Technology*. 145 (1) (2004): 14-20.

- <sup>37</sup> Stanton, T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 66 (10) (1940) 1781–1811.
- <sup>71</sup> Stark, D. C. Lithium salt admixtures—an alternative method to prevent expansive alkali–silica reactivity. *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction*. Concrete Society of U.K, London (1992), p. 1017.
- <sup>104</sup> Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali–silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1842–1856.
- <sup>105</sup> Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., Rogers, C.A. Prevention of damage due to alkali–aggregate reaction (AAR) in concrete construction – Canadian approach, *Cement, Concrete and Aggregates*. 19 (1) (1997) 26–30.
- <sup>45</sup> Thomson, M.L., Grattan-Bellew, P.E., Anatomy of a porphyro-blastic schist: alkali-silica reactivity. *Engineering Geology*. 35 (1993) 81–91.
- <sup>5</sup> Torres y Carrera consultores de comunicación. Pizarra: Magnitudes básicas y tendencias. Julio de 2010.
- <sup>77</sup> Tremblay, C., Bérubé, M. A., Fournier, B., Thomas, M. D. A., Folliard, K. J. Experimental investigation of the mechanisms by which LiNO<sub>3</sub> is effective against ASR. *Cement and Concrete Research*. 40 (4) (2010): 583-597.
- <sup>106</sup> UNE 146507-1: 99 EX, Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. Hormigón estructural. Normas UNE e Instrucción EHE, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).
- <sup>103</sup> UNE 146508: 99 EX, Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial álcali-sílice y álcali-silicato de los áridos. Método acelerado en probetas de mortero. Hormigón estructural. Normas UNE e Instrucción EHE, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).
- <sup>109</sup> UNE 146509: 99 EX, Determinación de la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos. Método de los prismas de hormigón. Hormigón estructural. Normas UNE e Instrucción EHE, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).
- <sup>85</sup> UNE 83-115-89, Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas, Asociación Española de Normalización y Certificación (1989).
- <sup>122</sup> UNE 83811:1992 EX Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de sacudidas (método de referencia). Asociación Española de Normalización y Certificación (1992).
- <sup>90</sup> UNE 83-816-93, Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua, Asociación Española de Normalización y Certificación (1993).

<sup>86</sup> UNE-EN 1015-2: 1993, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo, Asociación Española de Normalización y Certificación (1993).

<sup>87</sup> UNE-EN 1015-3: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas), Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

<sup>88</sup> UNE-EN 1015-6: 1999, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

<sup>89</sup> UNE-EN 1015-7: 1999, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

<sup>91</sup> UNE-EN 1015-9: 2000, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

<sup>86</sup> UNE-EN 1015-2: 1993, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo, Asociación Española de Normalización y Certificación (1993).

<sup>94</sup> UNE-EN 1015-10: 2000, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

<sup>93</sup> UNE-EN 1015-11: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

<sup>97</sup> UNE-EN 1015-12: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

<sup>96</sup> UNE-EN 1015-18: 2003, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).

<sup>95</sup> UNE-EN 1015-19: 1999, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).

<sup>86</sup> UNE-EN 1015-2: 1993, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo, Asociación Española de Normalización y Certificación (1993).

<sup>87</sup> UNE-EN 1015-3: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas), Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).

- <sup>88</sup> UNE-EN 1015-6: 1999, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).
- <sup>89</sup> UNE-EN 1015-7: 1999, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).
- <sup>91</sup> UNE-EN 1015-9: 2000, Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco, Asociación Española de Normalización y Certificación (2000).
- <sup>98</sup> UNE-EN 1052-3: 2003, Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).
- <sup>99</sup> UNE-EN 1052-3: 2003/A1, Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).
- <sup>84</sup> UNE-EN 1097-6: 2001, Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua, Asociación Española de Normalización y Certificación (2001).
- <sup>102</sup> UNE-EN 12370: 1999, Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales, Asociación Española de Normalización y Certificación (1999).
- <sup>110</sup> UNE-EN 12407: 07, Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico, Asociación Española de Normalización y Certificación (2007).
- <sup>100</sup> UNE-EN 1744-1: 2010, Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico, Asociación Española de Normalización y Certificación (2010).
- <sup>118</sup> UNE-EN 1745: 2002, Fabrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos de proyecto, Asociación Española de Normalización y Certificación (2002).
- <sup>123</sup> UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. Asociación Española de Normalización y Certificación (2005).
- <sup>114</sup> UNE-EN 998-1: 2010, Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido, Asociación Española de Normalización y Certificación (2010).
- <sup>115</sup> UNE-EN 998-2: 2003, Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería, Asociación Española de Normalización y Certificación (2003).

- <sup>101</sup> UNE-EN ISO 6988: 1996, Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad, Asociación Española de Normalización y Certificación (1996).
- <sup>7</sup> Unión Europea. Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE. Diario Oficial de la Unión Europea, de 4 de noviembre de 2006, L 102/15.
- <sup>50</sup> Velasco-Torres, A., Alaejos, P., Soriano, J. Comparative study of the alkali-silica reaction (ASR) in granitic aggregates, *Estudios Geologicos-Madrid*. 66 (1) (2010) 105-114.
- <sup>20</sup> Vieira, S. C., Ramos, A. S., Vieira, M. T. Mullitization kinetics from silica- and alumina-rich wastes. *Ceramics International*. 33 (1) (2007): 59-66.
- <sup>120</sup> Wakizaka, Y. Alkali-silica reactivity of Japanese Rocks. *Engineering Geology*. 56 (2000): 211-221.
- <sup>54</sup> Wang, Y., Deng, M., Tang, M. Alkali release from aggregate and the effect on AAR expansion. *Materials and Structures*. 41 (1) (2008): 159-171.
- <sup>11</sup> Watson, K. L., Eden, N. B., Farrant, J. R. Autoclaved aerated materials made from slate powder and Portland cement. *Precast Concrete*. 8 (2) (1977): 81-85.
- <sup>108</sup> Wigum, B. J., French, W. J., Howarth, R. J., Hills, C. Accelerated tests for assessing the potential exhibited by concrete aggregates for alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites*. 19 (1997) 45 I-476.
- <sup>67</sup> Wu, D. Y., Fang, K.H., Liu, Y.H. Suppressing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction by Using Limestone Powder. *Advances in Building Materials, Pts 1-3, Stafa-Zurich, Trans Tech Publications Ltd*. 168-170 (2011): 40-43.
- <sup>46</sup> Zhang, X., Blackwell, B.Q., Groves, G.W. The microstructures of reactive aggregates, *British Ceramic Transactions Journal*. 89 (1990) 89-92.



**ANEXO I: FICHAS POSIBLES DE LOS  
MORTEROS MEJORADOS**

---



**MI 1,25PM112****FICHA TÉCNICA****DESCRIPCIÓN**

Mortero gris de revoco y enlucido realizado con cemento tipo IV y árido de pizarra, clasificado como GP CSIV W2. Con elevadas resistencias mecánicas y baja absorción de agua. Recomendado para todo tipo de trabajos de revestimiento interior o exterior en obra.

Agua de amasado	15% en peso
Contenido de aire	11,8%
Densidad en estado fresco	2070 kg/m <sup>3</sup>
Retención de agua	86%
Período de trabajabilidad	208 min
Densidad en estado endurecido	1920 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexión	3,2 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	9,3 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la adhesión	0,49 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia inicial a cortante	0,82 N/mm <sup>2</sup>
Absorción por capilaridad	0,19 kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
Permeabilidad	μ 9
Resistencia al dióxido de azufre	APTO
Heladicidad	APTO
Resistencia a la cristalización de sales	APTO
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato	NO REACTIVO



**MI 1,25PM112/2,0V7031H****FICHA TÉCNICA****DESCRIPCIÓN**

Mortero gris de revoco y enlucido realizado con cemento tipo IV y árido de pizarra, clasificado como GP CSIV W2. Su excepcionalmente baja absorción de agua por capilaridad unida a una correcta permeabilidad al vapor lo hace especialmente recomendable para recubrimientos exteriores en obra.

Agua de amasado	15,5% en peso
Contenido de aire	10,5%
Densidad en estado fresco	2060 kg/m <sup>3</sup>
Retención de agua	89%
Período de trabajabilidad	298 min
Densidad en estado endurecido	1930 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexión	3,5 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	8,9 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la adhesión	0,30 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia inicial a cortante	0,84 N/mm <sup>2</sup>
Absorción por capilaridad	0,14 kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
Permeabilidad	μ 15
Resistencia al dióxido de azufre	APTO
Heladicidad	APTO
Resistencia a la cristalización de sales	APTO
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato	NO REACTIVO



**MI 1,25PM112/15CL90-S****FICHA TÉCNICA****DESCRIPCIÓN**

Mortero gris de revoco y enlucido realizado con cemento tipo IV, cal aérea y árido de pizarra, clasificado como GP CSIV W2. Con un amplio período de trabajabilidad y gran retención de agua y manejabilidad es un mortero idóneo para el revestimiento de grandes superficies tanto en exterior como en interior.

Agua de amasado	15,5% en peso
Contenido de aire	10,5%
Densidad en estado fresco	2100 kg/m <sup>3</sup>
Retención de agua	90%
Período de trabajabilidad	253 min
Densidad en estado endurecido	1930 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexión	2,5 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	9,4 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la adhesión	0,40 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia inicial a cortante	0,74 N/mm <sup>2</sup>
Absorción por capilaridad	0,19 kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
Permeabilidad	μ 10
Resistencia al dióxido de azufre	APTO
Heladicidad	APTO
Resistencia a la cristalización de sales	APTO
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato	NO REACTIVO



**MI 1,25PM112/15NHL-5****FICHA TÉCNICA****DESCRIPCIÓN**

Mortero de albañilería gris clasificado como M 10, realizado con cemento tipo IV, cal hidráulica y árido de pizarra. Idóneo para una amplia variedad de las fábricas de albañilería por su elevada resistencia a la compresión, a la adhesión y a cortante.

Agua de amasado	15% en peso
Contenido de aire	12%
Densidad en estado fresco	2050 kg/m <sup>3</sup>
Retención de agua	88%
Período de trabajabilidad	263 min
Densidad en estado endurecido	1910 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexión	3,5 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	11,3 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la adhesión	0,49 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia inicial a cortante	0,96 N/mm <sup>2</sup>
Absorción por capilaridad	0,23 kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
Permeabilidad	μ 7
Resistencia al dióxido de azufre	APTO
Heladicidad	APTO
Resistencia a la cristalización de sales	APTO
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato	NO REACTIVO



**MIV 1,25PM112****FICHA TÉCNICA****DESCRIPCIÓN**

Mortero de revoco y enlucido gris con tonalidad verdosa, clasificado como GP CSIV W2, realizado con cemento tipo IV y árido de pizarra. Por sus características de resistencia y permeabilidad al vapor es apto para todo tipo de revestimientos, tanto interiores como exteriores.

Agua de amasado	15,5% en peso
Contenido de aire	11,8%
Densidad en estado fresco	2040 kg/m <sup>3</sup>
Retención de agua	84%
Período de trabajabilidad	190 min
Densidad en estado endurecido	1910 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexión	2,7 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	9,0 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la adhesión	0,41 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia inicial a cortante	0,61 N/mm <sup>2</sup>
Absorción por capilaridad	0,34 kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
Permeabilidad	μ 8
Resistencia al dióxido de azufre	APTO
Heladicidad	APTO
Resistencia a la cristalización de sales	APTO
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato	NO REACTIVO



**MIV 1,25PM112/2,0V5010N****FICHA TÉCNICA****DESCRIPCIÓN**

Mortero de albañilería gris con tonalidad verdosa, clasificado como M 5, realizado con cemento tipo IV y árido de pizarra. Con baja densidad y un periodo de trabajabilidad elevado, es apto para fábricas de albañilería en general.

Agua de amasado	16,5% en peso
Contenido de aire	14%
Densidad en estado fresco	1950 kg/m <sup>3</sup>
Retención de agua	85%
Período de trabajabilidad	290 min
Densidad en estado endurecido	1880 kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a flexión	2,6 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	7,6 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la adhesión	0,38 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia inicial a cortante	0,68 N/mm <sup>2</sup>
Absorción por capilaridad	0,35 kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup>
Permeabilidad	μ 7
Resistencia al dióxido de azufre	APTO
Heladicidad	APTO
Resistencia a la cristalización de sales	APTO
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato	NO REACTIVO





