



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

**TESIS DE MÁSTER**

**MÁSTER**

**INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

**TÍTULO**

**DESARROLLO DE ÁRIDO SOLUBLE PARA FABRICACIÓN DE HORMIGONES  
POROSOS**

**AUTORA**

**BRUNNY BIENVENIDA MARTÍNEZ RODRÍGUEZ**

**TUTORES**

**SERGIO PIALARISSI CAVALARO  
IGNACIO SEGURA PÉREZ**

**DEPARTAMENTO**

**INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**FECHA**

**FEBRERO 2016**



## **AGRADECIMIENTOS**

*Ante todo, agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación y finalizar este máster, que me ha servido tanto para mi crecimiento profesional, como personal. Señor sé que sin ti, nada es posible.*

*Quiero agradecer también a mi madre Bienvenida Rodríguez, por ser mi fuente de motivación y apoyo durante todo este proceso, pese a la distancia que nos separa. Sé que sin tu apoyo incondicional y el inmensurable amor que me brindas día tras día, hubiese sido más difícil alcanzar esta meta.*

*También agradezco a mis tutores Sergio Pialarissi e Ignacio Segura por todo su tiempo, dedicación y las correcciones que harían de éste, un mejor trabajo. El conocimiento es algo de gran valor, y ustedes con gusto han lo han compartido conmigo.*

*Al personal del laboratorio, especialmente a Celia Vargas y Francesc Servos, por todo el empeño y la dedicación puesta durante el desarrollo de la investigación. Gracias por tener la disposición de ayudarme siempre.*

*Finalmente, agradecer a mis compañeros Richard Javier, Rolando Mercedes, Ana De León y Scarlet Travieso por compartir conmigo los buenos y malos momentos de este trayecto, que ha sido una gran aventura para todos nosotros.*

*Muchas Gracias a Todos.*



## RESUMEN

El hormigón poroso es un tipo especial de hormigón debido al alto índice de porosidad que presenta su estructura, obtenida mediante la eliminación parcial o total de áridos finos en su esqueleto granular, singularidad que le confieren una menor resistencia y una dificultosa trabajabilidad. Pese a estas dos limitantes, interesa la capacidad de este tipo de hormigón de dejar pasar el agua a través de su estructura, haciendo de éste un material de construcción con numerosas utilidades al momento de enfrentar los problemas que se generan a partir de la acumulación de agua en las zonas urbanas, y con un menor impacto ambiental en cuanto al consumo de recursos naturales.

El problema de la mala trabajabilidad de los hormigones porosos debido a la falta de finos, limita su campo de aplicación en el sector de la construcción. Así, en busca de mejorar este inconveniente se propone en esta tesina desarrollar un tipo de árido que favorezca la trabajabilidad de la mezcla estando presente durante el estado fresco del hormigón, y luego se disuelva dejando poros interconectados, obteniéndose así un hormigón poroso y con una muy buena trabajabilidad o características autocompactantes.

Para ello se ha abierto una línea de investigación en la que se han evaluado materiales, que de acuerdo a su capacidad de disolverse en las matrices cementicias, se empleen como áridos en hormigones dando como resultado una mezcla autocompactante y alto índice de porosidad. Entre dichos materiales se encuentran dos tipos de arcilla que son Zeolita y Sepiolita, un polímero termoplástico, urea, y cinco polisacáridos entre los que se encuentran la celulosa, dos tipos de almidones y dos derivados de guar.

Estos materiales pasaron por fases de experimentación de carácter selectivo, extendiéndose el estudio a fases posteriores con los materiales que presentaran las mejores características para ser empleados como áridos solubles. Así se evaluaron mezclas de morteros con la incorporación de cada uno de los materiales estudiados, descartando los que en las primeras fases no presentaron características favorables. Luego conformando mezclas con diferentes dosificaciones e incorporaciones de aditivos inclusores de aire y acelerantes de fraguado, buscando la mejora continua de las mezclas con los materiales que tuvieron un mejor comportamiento.

Producto de tales estudios se ha encontrado que la urea representa la mejor opción entre los materiales estudiados para ser empleada como un árido soluble en la matriz de mezclas cementicias, corrigiendo ciertos efectos colaterales de su adición con la ayuda de aditivos. Y se ha sentado bases para continuar con investigaciones futuras sobre este material o compuestos de naturaleza similar en mezclas de hormigones.

## ABSTRACT

Porous concrete is a special kind of concrete due to the high porosity that characterizes its structure, obtained by the partial or total elimination of fine aggregates from its granular skeleton, uniqueness which gives lower mechanical strength and difficult workability. Despite these limitations, it's interesting the ability that this kind of concrete has for letting water pass through its structure, making it a material with multiple uses in the moment to face the problems of accumulation of water in urban areas, and also it is less aggressive to the environment.

The problem of poor workability of porous concrete due to its lack of fine aggregates, limits its applications in the construction sector. Looking for improving this drawback, it is proposed in this thesis to develop an aggregate that helps the workability of the mixture being present in the fresh concrete, and then this aggregates dissolves leaving interconnected pores, obtaining a porous concrete with a good workability or self-compacting characteristics.

For that reason, this new research has been opened in order to evaluate some materials, according to their ability to dissolve in cement matrices, to be used as aggregate in concrete mixture, resulting self-compacting mixtures with a high level of porosity. Those materials are: two kinds of clay that are zeolite and sepiolite, a thermoplastic polymer, urea, and five polysaccharides like cellulose, two kind of starches and two guar derivatives.

These materials have been evaluated through different phases of experimentation, extending this investigation to the materials that presented the best characteristics to be used as soluble aggregates. Different mortar mixes were evaluated with the addition of each of the materials studied. Based on the results obtained, the best materials were selected. Mixes were then produced with entraining air at mixtures, seeking an improvement of the connected porosity of the material.

It has been found that urea is the best choice among the materials studied to be used as a soluble aggregate into the matrix of cementitious mixtures, correcting certain side effects of their addition to the mixtures with the help of additives. This study set the bases for additional studies about this materials, or others with similar composition that may be used in mortar and concrete mixtures.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. FILOSOFÍA DE ESTUDIO .....	2
1.4. ESTRUCTURAS DEL DOCUMENTO .....	3
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	5
2.2. EL HORMIGÓN POROSO .....	6
2.2.1. <i>Reseña Histórica.....</i>	6
2.2.2. <i>Definición y Utilidades del Material .....</i>	6
2.2.3. <i>Características del Hormigón Poroso .....</i>	8
2.2.4. <i>Aspectos de Puesta en Obra y Trabajabilidad .....</i>	9
2.3. ESTUDIOS REALIZADOS PARA MEJORA DE LAS PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES POROSOS ....	11
2.4. PROPUESTA CIENTÍFICA .....	12
2.4.1. <i>Técnica para la Obtención de Materiales con Porosidad Controlada .....</i>	12
2.4.2. <i>Materiales Solubles en Medios Alcalinos .....</i>	13
2.5. DISCUSIÓN .....	16
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	17
3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	18
3.3. FASE 1: EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE DISOLUCIÓN .....	19
3.3.1. <i>Metodología.....</i>	19
3.3.2. <i>Materiales para el Árido Soluble .....</i>	19
3.3.3. <i>Materiales para la Solución Alcalina .....</i>	22
3.3.4. <i>Preparación y Condiciones de Conservación de las Muestras .....</i>	22
3.3.5. <i>Ensayo de Caracterización de la Cinética de Disolución .....</i>	23
3.4. FASE 2: ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ÁRIDO SOLUBLE- MORTEROS.....	23
3.4.1. <i>Metodología.....</i>	23
3.4.2. <i>Materiales para Preparación de los Morteros .....</i>	24
3.4.3. <i>Dosificación y Preparación de los Morteros. ....</i>	24
3.4.4. <i>Proceso de Fabricación y Curado de las Probetas .....</i>	25
3.4.5. <i>Observaciones y Evaluaciones para Descartar Materiales No Idóneos.....</i>	26
3.5. FASE 3: ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ADITIVOS AIREANTES-MORTEROS .....	26
3.5.1. <i>Metodología.....</i>	26
3.5.2. <i>Aditivos Inclusores de Aire Estudiados .....</i>	27
3.5.3. <i>Dosificación y Preparación de los Morteros .....</i>	27
3.5.4. <i>Proceso de Fabricación y Curado de las Probetas .....</i>	28
3.5.5. <i>Observaciones y Ensayos para Evaluar la Idoneidad de los Aditivos.....</i>	28
3.6. FASE 4: COMBINACIÓN ÁRIDO SOLUBLE-ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE EN MORTEROS.....	31
3.6.1. <i>Metodología.....</i>	31
3.6.2. <i>Materiales para Preparación de los Morteros .....</i>	32
3.6.3. <i>Composición y Dosificación de los Morteros .....</i>	35
3.6.4. <i>Preparación de los Morteros .....</i>	36
3.6.5. <i>Proceso de Fabricación y Curado de las Probetas .....</i>	36

3.6.6.	<i>Observaciones y Ensayos de Materiales Idóneos</i> .....	36
<b>CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....		<b>38</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	38
4.2.	RESULTADOS DE LA FASE 1: EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE DISOLUCIÓN .....	39
4.2.1.	<i>Disolución de la Zeolita</i> .....	39
4.2.2.	<i>Disolución de la Sepiolita</i> .....	39
4.2.3.	<i>Disolución del Polímero Termoplástico</i> .....	40
4.2.4.	<i>Disolución de la Urea</i> .....	40
4.2.5.	<i>Disolución de la Celulosa</i> .....	41
4.2.6.	<i>Disolución del Almidón Modificado</i> .....	41
4.2.7.	<i>Conclusiones Parciales Sobre la Fase 1</i> .....	41
4.3.	RESULTADOS DE LA FASE 2: INTERACCIÓN ÁRIDO SOLUBLE-PASTA DE MORTEROS .....	42
4.3.1.	<i>Interacción de los Morteros con la Zeolita</i> .....	42
4.3.2.	<i>Interacción de los Morteros con la Sepiolita</i> .....	42
4.3.3.	<i>Interacción de los Morteros con el Polímero Termoplástico</i> .....	43
4.3.4.	<i>Interacción de los Morteros con la Urea</i> .....	43
4.3.5.	<i>Interacción de los Morteros con la Celulosa</i> .....	45
4.3.6.	<i>Interacción de los Morteros con el Almidón Modificado</i> .....	45
4.3.7.	<i>Conclusiones Parciales Sobre la Fase 2</i> .....	46
4.4.	RESULTADOS DE LA FASE 3: INTERACCIÓN ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE-PASTA DE MORTEROS	47
4.4.1.	<i>Distribución y Tipo de Burbuja Generada</i> .....	47
4.4.2.	<i>Densidades, Porosidad Accesible al Agua y Resistencias</i> .....	48
4.4.3.	<i>Conclusiones Parciales Sobre la Fase 3</i> .....	49
4.5.	RESULTADOS DE LA FASE 4: COMBINACIÓN ÁRIDO SOLUBLE-ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE EN MORTEROS.....	50
4.5.1.	<i>Disolución Controlada y Efectos Secundarios en la Matriz de los Mortero</i> .....	50
4.5.2.	<i>Consistencia de la Mezcla</i> .....	56
4.5.3.	<i>Tiempo de Fraguado de los Morteros</i> .....	56
4.5.4.	<i>Densidades, Porosidad Accesible al Agua y Resistencias Mecánicas de los Morteros con Urea</i> 58	
4.5.5.	<i>Conclusiones Parciales Sobre la Fase 4</i> .....	60
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....		<b>61</b>
5.1.	CONCLUSIONES GENERALES .....	61
5.2.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	63
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		<b>64</b>
<b>ANEXOS. FICHAS DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS</b> .....		<b>66</b>
ANEXO A: ZEOLITA .....		66
ANEXO B: SEPIOLITA.....		67
ANEXO C: UREA .....		68
ANEXO D: ADITIVO MASTER AIR 100 .....		69
ANEXO E: ADITIVO MELMIX I .....		70
ANEXO F: ADITIVO MASTERCCELL 10.....		71
ANEXO G: ADITIVO GLUPOCON .....		72
ANEXO H: ALMIDÓN SPECIAL STARCH 6007 .....		73
ANEXO I: POLISACÁRIDO ESACOL .....		74
ANEXO J: POLISACÁRIDO LAMSIZE .....		75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Esquema de la estrategia investigativa .....	3
Figura 1. 2. Esquema de la estructura del documento .....	4
Figura 2.3. Aplicaciones del hormigón poroso. a) Cancha, b) Estacionamiento, c) Pavimento carretero. Fuente: Omicrono.com .....	7
Figura 2.4. Esquema de estructura típica y funcionamiento de un pavimento de concreto permeable. Fuente: blog.360gradosenconcreto.com .....	7
Figura 2.5. Representación esquemática de diferentes curvas granulométricas: a) tamaño uniforme, b) gradación continua, c) sustitución de áridos gruesos por áridos pequeños, d) curva discontinua y e) gradación sin finos (Mindess et al. - 2002). .....	8
Figura 2.6. Procedimiento de puesta en obra de un hormigón poroso. 1) Entrega, 2) Ejecución, 3) Nivelación, 4) Compactación, 5) Protección. Fuente: lafarque.com.....	10
Figura 2.7. Comparación entre el cono y la fluencia de un hormigón poroso convencional (CPC) y un hormigón poroso de propiedades mejoradas (HPPC) (Bhutta et al. - 2011). .....	12
Figura 2.8. Imagen obtenida por tomografía computarizada de rayos-X de una cerámica altamente porosa obtenida a partir de celulosa (Fey - 2012). .....	12
Figura 3. 1. Esquema del proceso experimental .....	18
Figura 3. 2. Muestras de Zeolitas de 0,5 a 1 mm. ....	19
Figura 3. 3. Aspecto visual de la sepiolita estudiada.....	20
Figura 3. 4. Aspecto visual del polímero termoplástico objeto de estudio. ....	20
Figura 3. 5. Aspecto visual de la muestra de urea estudiada.....	21
Figura 3. 6. Muestra de celulosa estudiada .....	21
Figura 3. 7. Aspecto visual a) almidón industrial y, b) almidón modificado .....	22
Figura 3. 8. Preparación de las muestras para la disolución del árido soluble. a) depósito de la solución alcalina, b) depósito del soluto (en este caso Urea). .....	23
Figura 3. 9. Proceso de ensayo para determinar la cinética de disolución de las muestras (en el caso de la urea), a) filtrada, b) secada, c) pesada. ....	23
Figura 3. 10. Amasadora utilizada para la preparación de los morteros. ....	25
Figura 3. 11. Enmoldado de probetas .....	25
Figura 3. 12. Cámara húmeda del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC.....	26
Figura 3. 13. Microscopio utilizado para evaluar la estructura de los morteros con aire ocluido....	28
Figura 3. 14. Proceso de ensayo para determinar densidades y porosidad accesible al agua, a) peso seco, b) saturación por inmersión, c) peso tras saturación por ebullición, d) peso aparente.....	29
Figura 3. 15. Máquinas de ensayo de resistencia mecánica, a) para ensayo de flexión, b) para ensayo de compresión.....	30
Figura 3. 16. Esquema de funcionamiento del árido parcialmente soluble.....	33
Figura 3. 17. Aspecto visual de los polisacáridos en polvo, a) Special Starch 6007, b) Esacol HS 30 R, c) Lamsize 5300. ....	34

Figura 3. 18. Proceso de Preparación de áridos parcialmente solubles, a) mezcla de arena, cemento y un tipo de almidón, b) árido parcialmente soluble con Special Starch 6007 y Master Air(SMA), c) árido parcialmente soluble con Esacol HS 30 R y Master Air(EMA), d) árido parcialmente soluble con Lamsize 5300 y Master Air (LMA), e) árido parcialmente soluble con Special Starch 6007 y Melmix I (SM), f) árido parcialmente soluble con Esacol HS 30 R y Melmix (EM) g) árido parcialmente soluble con Lamsize 5300 y Melmix(LM).....	34
Figura 3. 19. Mesa de sacudidas para ensayo de consistencia de los morteros.....	36
Figura 4. 1. Cinética de disolución de la zeolita, a) muestra expuesta a la solución alcalina, b) curva de disolución .....	39
Figura 4. 2. Cinética de disolución de la Sepiolita, a) muestra expuesta a la solución alcalina, b) curva de disolución .....	39
Figura 4. 3. Cinética de disolución del Polímero termoplástico, a) muestra expuesta a la solución alcalina, b) curva de disolución .....	40
Figura 4. 4. Curva de disolución de la urea .....	40
Figura 4. 5. Curva de disolución de la celulosa .....	41
Figura 4.6. Cinética de disolución del almidón modificado .....	41
Figura 4. 7. Probeta de mortero con Zeolita. Edad de 10 días.....	42
Figura 4. 8. Probeta de mortero con Sepiolita. Edad de 10 días.....	43
Figura 4. 9. Probeta de mortero con el polímero termoplástico, a) Edad de 2 días, b) Edad de 11 días .....	43
Figura 4. 10. Probeta de mortero con urea. Edad de 2 días. ....	44
Figura 4. 11. Probeta de mortero con urea a edad de 5 días, a) superficie de la probeta, b) interior de la probeta .....	44
Figura 4.12. Estructura del mortero con urea con sales cristalizadas a edad de 16 días a) superficie de la probeta, b) interior de la probeta .....	45
Figura 4. 13. Probeta de mortero con celulosa. Edad de 16 días.....	45
Figura 4. 14. Probeta de mortero con almidón modificado. Edad de 2 días.....	46
Figura 4.15. Estructura del mortero aditivado con Master Air 100, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica. ....	47
Figura 4.16. Estructura del mortero aditivado con Melmix, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica. ....	47
Figura 4.17. Estructura del mortero aditivado con MasterCell 10, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica. ....	48
Figura 4. 18. Estructura del mortero aditivado con Glucopon 215, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica. ....	48
Figura 4. 19. Aspecto de Mortero con Special Starch 6007 y Melmix I (SM), a) superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda. ....	50
Figura 4. 20. Aspecto de mortero con Esacol HS 30 R y Master Air (EMA), a) superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda. ....	51

Figura 4. 21. Aspecto de mortero con Esacol HS 30 R y Melmix (EM). a) Superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda. ....	51
Figura 4. 22. Aspecto de mortero con Special Starch 6007 y Master Air (SMA), a) superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda.....	52
Figura 4. 23. Aspecto de mortero con Lamsize 5300 y Master Air (LMA), a) Superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda .....	52
Figura 4. 24. Aspecto de morteros con Lamsize 5300 y Melmix (LM). a) Superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda. ....	53
Figura 4. 25. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA1. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas.....	54
Figura 4. 26. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA2, a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas.....	54
Figura 4. 27. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA3, a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas.....	54
Figura 4. 28. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA4. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas.....	55
Figura 4. 29. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA5. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas.....	55
Figura 4. 30. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA6. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas.....	55
Figura 4. 31. Gráfico de densidad aparente vs porosidad accesible al agua de los morteros con urea .....	59
Figura 4. 32. Gráfico de la densidad aparente vs resistencia a compresión de los morteros con urea .....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Materiales para ser estudiados como árido solubles en la Fase 1.....	19
Tabla 3. 2. Composición de los morteros con material para árido soluble.....	24
Tabla 3. 3. Composición del Mortero con Urea .....	25
Tabla 3. 4. Composición del mortero de referencia.....	27
Tabla 3. 5. Composición de morteros con aditivos inclusores de aire.....	28
Tabla 3. 6. Materiales para árido soluble objeto de estudio de la fase 4 .....	32
Tabla 3. 7. Composiciones y dosificaciones de los áridos parcialmente solubles a base de polisacáridos.....	33
Tabla 3. 8. Composición de los morteros con áridos preparados a base de almidón y aditivos inclusores de aire .....	35
Tabla 3. 9. Composición de los morteros con urea y aditivos inclusores de aire (morteros UA) .....	35
Tabla 3. 10. Designación de consistencias de los morteros.....	37
Tabla 4. 1. Densidades y resistencias de las probetas con aditivos inclusores de aire.....	49
Tabla 4. 2. Consistencias de los morteros con áridos preparados a base de polisacáridos.....	56
Tabla 4. 3. Consistencias de los morteros con urea y aditivos inclusores de aire .....	56
Tabla 4. 4. Tiempos de fraguado para los morteros preparados a base de polisacáridos.....	57
Tabla 4. 5. Tiempos de fraguado para los morteros con urea y aditivos inclusores de aire.....	57
Tabla 4. 6. Densidad, porosidad y resistencias de los morteros con urea .....	58



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de modelos de construcción sostenible ha pasado de ser una cuestión de elección, a ser una necesidad cada vez más reconocida y regulada el sector, buscándose la implementación de medidas que mejoren el comportamiento medioambiental de las diferentes prácticas constructivas. Así, las tendencias actuales se dirigen al desarrollo de nuevos materiales de construcción cada vez menos agresivos contra el medio ambiente, cuya producción consuma el mínimo posible de recursos, y cuya utilización genere el mínimo impacto ambiental que esto implica.

En este sentido, el hormigón poroso se consideran más sostenibles frente a otros tipos de hormigones, ya que demandan menor utilización de recursos durante su fabricación al minimizarse o incluso eliminarse de la fracción de áridos finos dentro de sus componentes para generar la porosidad característica. Además, es más compatible con el medio ambiente ya que dicha porosidad aumenta el índice de infiltración de las aguas pluviales al subsuelo, lo que contribuye a mantener el ciclo del agua en zonas urbanizadas. A su vez, esto reduce el caudal que debe ser recogido por los alcantarillados, riesgos de inundaciones y accidentes por los usuarios en carreteras.

El hecho de eliminar finos, además de comprometer las propiedades mecánicas de los hormigones porosos, dificulta la obtención de la buena trabajabilidad de las mezclas, la cual es una característica de los hormigones con alto contenido de finos como los hormigones autocompactantes. La presencia de finos favorece la manejabilidad de los hormigones y propicia un alto nivel de compacidad, resultando un hormigón con índice muy reducido de huecos en su granulometría por lo que se reduce considerablemente la porosidad.

En este sentido, supone un reto de difícil materialización, conseguir un hormigón que sea poroso, y que sea a la vez muy trabajable o autocompactante. Así, aparece el interés de la presente investigación, que busca alternativas para superar estas limitantes que presenta el hormigón porosos, a modo de posibilitar nuevos campos de aplicación y el aprovechamiento de las ventajas que ya presenta como material poroso.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es evaluar estrategias alternativas para la obtención de mezclas cementicias porosas mediante el desarrollo de un árido que sea soluble en la matriz del hormigón, que esté presente en el estado fresco, y tras la puesta en obra se disuelva dejando una serie de poros interconectados, generando mezclas porosas y, a la vez autocompactantes.

Para conseguir el objetivo general, se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar materiales para la fabricación del árido soluble acorde a la posibilidad de su disolución en medios fuertemente alcalinos.
- Caracterizar la cinética de disolución de los materiales seleccionados para la fabricación del árido soluble en un medio que simule el ambiente de elevada alcalinidad generado por los materiales cementicios.
- Identificar las consecuencias de la incorporación de los materiales seleccionados para fabricación del árido soluble en las propiedades mecánicas y en la microestructura de las mezclas de morteros.
- Evaluar aditivos inclusores de aire que contribuyan al aumento de la porosidad y mejora de trabajabilidad en las mezclas de morteros.
- Determinar cuál o cuáles serían los materiales más idóneos para ser utilizados en mezclas porosas, con características autocompactantes.

## 1.3. FILOSOFÍA DE ESTUDIO

Los objetivos de esta investigación se han planteado como medios para obtener soluciones alternativas a las limitaciones que presentan los hormigones porosos en cuanto a sus propiedades mecánicas, y principalmente en cuanto a su trabajabilidad.

Es característico y una propiedad intrínseca, la ausencia o poca presencia de finos en el esqueleto granular de un hormigón poroso, lo que le confiere su característica porosidad. Pero esto a la vez imposibilita la obtención de una buena trabajabilidad dado que, la condición más importante para una buena compactación y elevada manejabilidad (principales características de los hormigones autocompactantes), es una cantidad significativa de áridos finos en el hormigón. Así, vemos que los hormigones porosos requieren de una composición de características opuestas, en cuanto a los áridos se refiere, frente a los hormigones autocompactantes que presentan una buena trabajabilidad.

En la Figura 1.1 se presenta esquemáticamente la estrategia investigativa seguida para evaluar opciones que pueden conferir porosidad y buena trabajabilidad en mezclas de morteros:

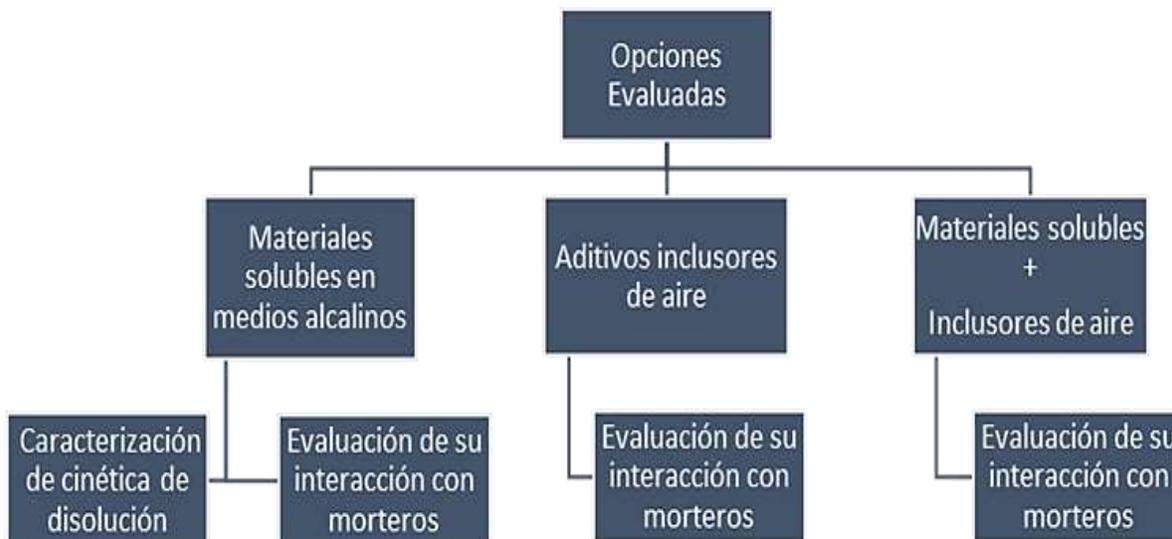


Figura 1. 1. Esquema de la estrategia investigativa

Se ha planteado la opción de seleccionar materiales que sean solubles en medios alcalinos para desarrollar un árido que se solubilice controladamente en la matriz cementicia de un hormigón, debido a la acción del medio alcalino generado por los materiales cementicios. De manera que este árido esté presente en el estado fresco del hormigón, manteniendo características autocompactantes en cuanto a reología y consistencia de las mezclas. Pero la disolución de los áridos en el medio generado por la hidratación del cemento, permitirá el desarrollo de la red de poros interconectada característica de un hormigón poroso.

Por otro lado, los aditivos inclusores de aire, además de añadir burbujas a las mezclas de hormigón, lo que consecuentemente genera porosidad, suelen contribuir dando una mejor manejabilidad a la mezcla, así también se evalúa la posibilidad lograr el material deseado complementando las mezclas con aire ocluido proporcionado por dicho tipo de aditivos.

#### 1.4. ESTRUCTURAS DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra dividido en 5 capítulos, en los cuales se presenta la información resultado de investigación y se describe de forma detallada los procesos de experimentación realizados en torno al presente estudio. También consta de una bibliografía y anexos. El contenido del documento se explica breve y esquemáticamente en la siguiente Figura 1.2.:

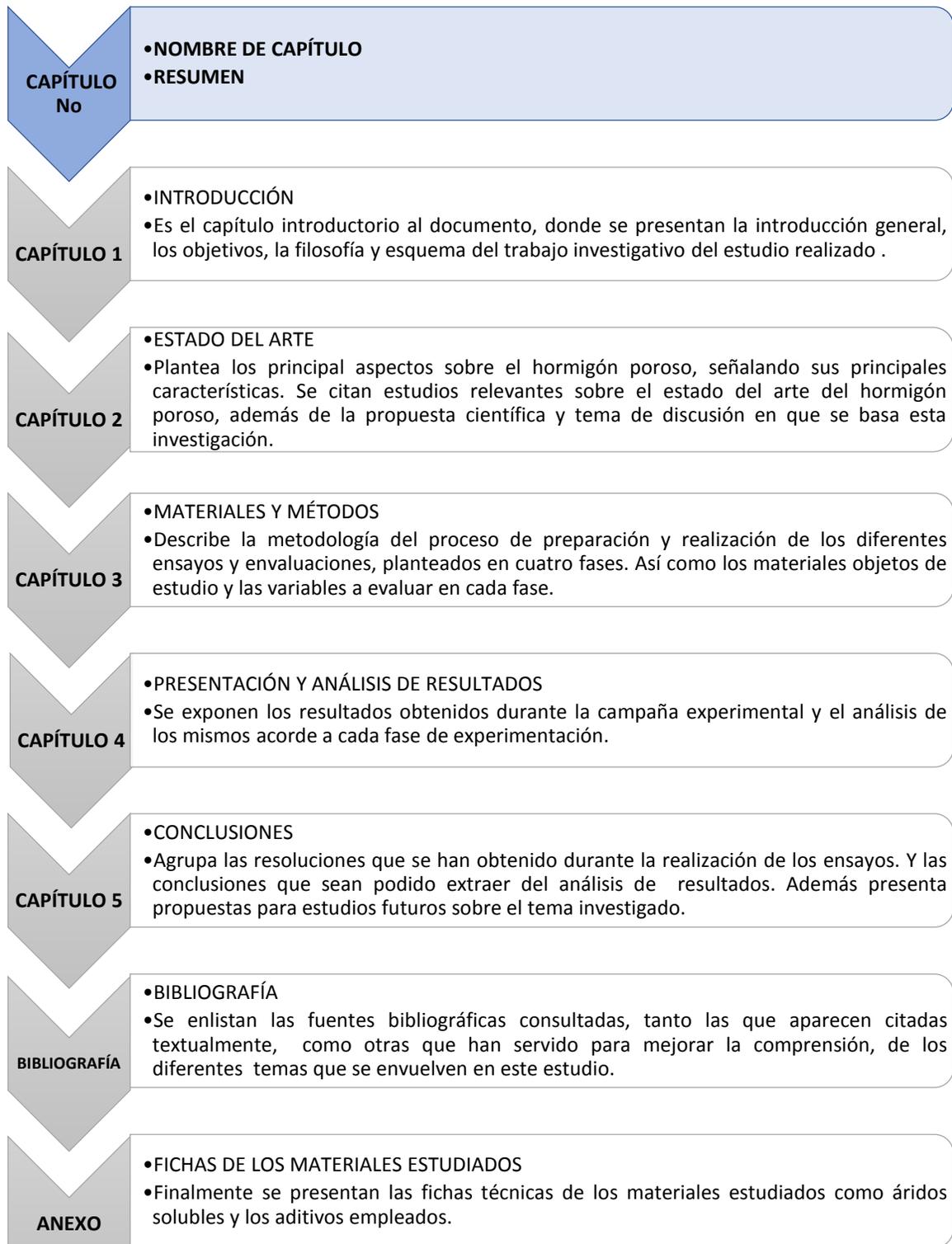


Figura 1. 2. Esquema de la estructura del documento

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de agua en zonas pavimentadas, debido al impedimento de la filtración de las precipitaciones o la ineficiencia de los sistemas de drenaje fluvial, presentan una problemática cada vez más notable en los centros urbanos. De ahí que ha surgido y cada vez es más importante, el desarrollo del hormigón poroso, como un tipo de hormigón especial de baja densidad cuya principal función es permitir el paso del agua a través de él y por ende, evitar los efectos colaterales de la presencia del agua y acumulación de la misma.

En este capítulo se plantea los principales aspectos sobre el hormigón poroso, tales como la descripción y utilidades de este material, características principales, aspectos de trabajabilidad y puesta en obra del mismo. Esto a modo de exponer las ventajas y limitantes del material.

También se citan los estudios más relevantes encontrados que hasta el momento han buscado la optimización de las propiedades del hormigón poroso.

Seguidamente, se explica la propuesta científica que este estudio plantea como medio para superar las limitantes y mantener las ventajas del hormigón poroso, la cual ha surgido siguiendo una técnica que la industria cerámica utiliza para la fabricación de materiales con porosidad controlada, consistente en calcar las llamadas plantillas de sacrificio en las cerámicas durante el proceso de sinterización, dejando huecos o poros una vez calcinado el material.

Siguiendo esta idea se ha planteado, como técnica equivalente, aprovechar la elevada alcalinidad del hormigón para solubilizar materiales que dejen porosidad en la matriz una vez disueltos. Así, también se explican los tipos de materiales que, debido a su naturaleza química, se han tomado para ser estudiados como el llamado árido soluble.

Para concluir el capítulo se presenta la discusión, en base a los conceptos desarrollados dentro del mismo, justificando los motivos por los cuales se han planteado esta investigación.

## 2.2. EL HORMIGÓN POROSO

### 2.2.1. Reseña Histórica

La historia del concreto poroso o permeable se remonta a 1852. Los primeros usos reconocidos del hormigón poroso se dieron en Europa a principios del siglo XIX. Sin embargo, sus aplicaciones crecieron especialmente al concluir la Segunda Guerra Mundial, como una respuesta ante la necesidad de reconstruir edificaciones y carreteras con medios limitados. La escasez de materiales, así como el alto coste de estos y su transporte, dieron paso a la utilización de un hormigón sin finos que disminuía los contenidos de cemento en las mezclas y permitía reciclar escombros (Dogén, 2014).

Es un material relativamente nuevo; una de sus primeras aplicaciones fue la fabricación de tubos drenantes al final de los años 50, aunque con el aprovechamiento simultáneo de las dos propiedades no se efectuaría hasta muy entrada la década de los 70 (Ripollés, et al., 1987).

Pero hasta hace aproximadamente 20 años que fue exitosamente puesto en práctica en varias aplicaciones en diversos estados de los Estados Unidos, que se implementó en áreas cercanas a árboles, reducción de escurrimientos pluviales y aumentar la permeabilidad en ciertas áreas. Este producto se desarrolló a mediados de la década de los 90 y se emplea básicamente en pavimentos, guarniciones y banquetas (Anon., 2015).

A principios de los años 90 se realizaron en diversos países (Alemania, España y Países Bajos), una serie de tramos experimentales con hormigón poroso. La intención era examinar la eficacia de distintos procesos de ejecución (“wet on wet” y “wet on dry”) y observar la evolución del comportamiento funcional del material ante una situación real de servicio (Aguado & Agulló, 2002).

Actualmente se reconoce que la utilización del hormigón poroso puede ser en ocasiones, una forma adecuada de resolver ciertos problemas ingenieriles, principalmente de la técnica de carreteras. Con ello, en los últimos años ha aumentado el número de investigaciones. La mayoría de las investigaciones se hacen sobre la mejora de la unión entre áridos por la pasta de cemento, sobre la influencia en las propiedades de diferentes tipos de áridos, así como de la granulometría de estos, la optimización del diseño, y sobre la puesta en obra con investigaciones sobre los diferentes y mejores métodos de compactación. De manera que se avanza hacia un mejor conocimiento del material, tanto de sus posibilidades como de sus limitaciones (Dogén, 2014).

### 2.2.2. Definición y Utilidades del Material

El hormigón poroso, conocido también como hormigón sin finos u hormigón permeable, es un tipo especial de hormigón ligero con elevada porosidad que permite que el agua de precipitaciones y otras fuentes pase a través de su estructura.

El hormigón poroso está constituido por cemento, agregado grueso, muy poca cantidad o nada de agregado fino, aditivos y agua, que una vez endurecido debe de cumplir una doble función de permeabilidad y resistencia. Debe tener la suficiente cantidad de pasta de cemento para cubrir las partículas de agregado grueso preservando la interconectividad de los vacíos. La Instrucción Española del Hormigón (EHE-08) define como árido fino o arenas a la fracción del mismo que pasa

por el tamiz de 4mm ASTM, siendo el árido grueso la fracción del mismo que queda retenida en ese tamiz.

El hormigón poroso o permeable es usado tradicionalmente en áreas de estacionamiento, pavimentos para áreas de tráfico ligero, pasos peatonales, caminos en parques, zoológicos, invernaderos, y zonas cuya superficie genere áreas de pavimentos de magnitudes considerablemente grandes.



Figura 2.3. Aplicaciones del hormigón poroso. a) Cancha, b) Estacionamiento, c) Pavimento carretero. Fuente: Omicrono.com

Su importancia y utilidades se podrían resumir en tres aspectos fundamentales mayor seguridad para el usuario de carreteras, conservación de integridad y mayor durabilidad de las estructuras, y que contribuye con la construcción sostenible. En el caso de los pavimentos, el agua, debilita la resistencia de los suelos, fatiga prematuramente las estructuras, erosiona las fundaciones y debilita las interfases. El agua en superficie reduce o hasta suprime la adherencia de los neumáticos. La existencia de una película de agua provoca el hidroneo y el salpicado continuo y la niebla reduce la visibilidad e incrementa la fatiga del conductor.

Así, para incrementa la seguridad en las vías urbanas, la elevada porosidad de este hormigón provoca una infiltración casi inmediata del agua en el seno del pavimento ( Figura 1.1.), y de esta forma se reduce o elimina el “salpicado” (splash) y la niebla y se evita la ocurrencia de hidroneo. Aún en condiciones reales de congelamiento, la falta de acumulación de agua en superficie evita la formación del hielo, conservándose valores importantes de adherencia vehículo- pavimento.

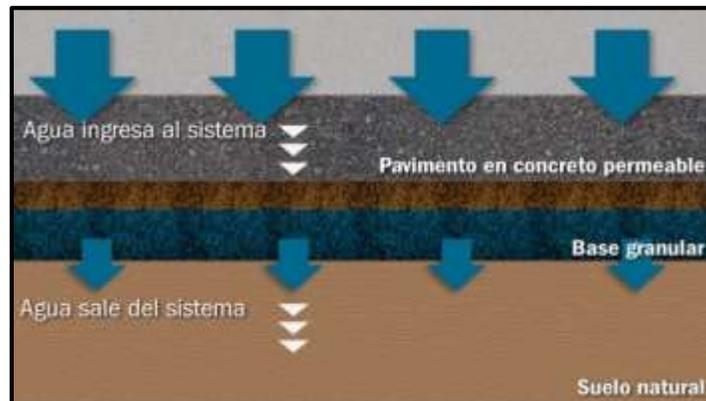


Figura 2.4. Esquema de estructura típica y funcionamiento de un pavimento de concreto permeable. Fuente: blog.360gradosenconcreto.com

Es una importante aplicación para la construcción sostenible, el adecuado drenaje de las aguas pluviales que filtran directamente al terreno minimiza el impacto ambiental permitiendo la transferencia de agua y aire a los sistemas de raíces dejando que los árboles florezcan incluso en las áreas altamente desarrolladas, y reduce las cargas de polución que pueden entrar en los arroyos, lagunas y ríos. Su superficie refleja mejor la luz que un pavimento convencional por lo que genera bajo almacenamiento de calor y menor coste de iluminación.

No fue sino por casualidad que se comprobó que pavimentos porosos resultaban más silenciosos frente al tránsito vehicular. Estas ventajas acústicas y de confort resultaron una ventaja significativa en el contexto socio – político de la década del '80, en la que el medio ambiente y el confort del usuario adquieren mayor importancia.

### 2.2.3. Características del Hormigón Poroso

Una superficial, aunque correcta descripción del hormigón poroso diría que se trata de un hormigón convencional al que se le ha sustraído una gran parte del árido fino. Las consecuencias de tal sustracción se ponen de manifiesto, tanto en las propiedades del producto acabado, como también en los procesos de fabricación y puesta en obra (Ripollés, et al., 1987).

Se muestran una serie de representaciones esquemáticas de diferentes granulometrías de áridos (Mindess, et al., 2002), que van desde una curva granulométrica uniforme (a), hasta una curva granulométrica sin finos (e), que sería el caso de los hormigones porosos.

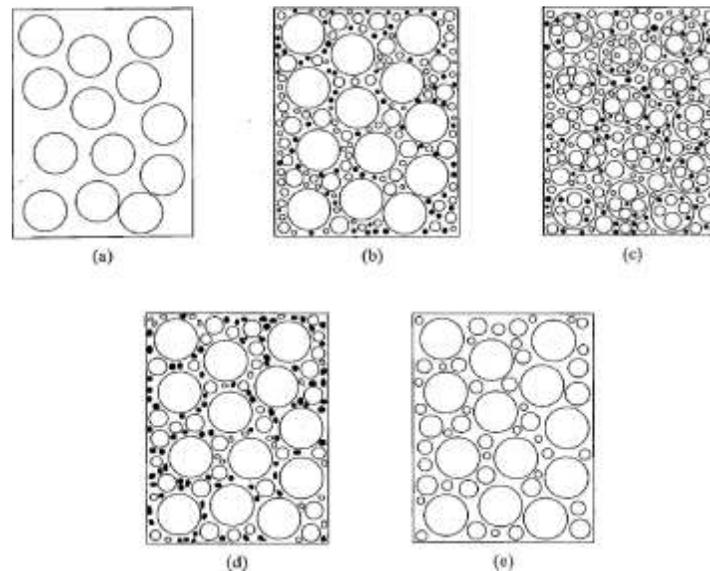


Figura 2.5. Representación esquemática de diferentes curvas granulométricas: a) tamaño uniforme, b) gradación continua, c) sustitución de áridos gruesos por áridos pequeños, d) curva discontinua y e) gradación sin finos (Mindess et al. - 2002).

La combinación de una curva granulométrica sin finos y de un menor contenido de pasta de cemento es la que permite obtener las elevadas porosidades y permeabilidades de los hormigones porosos. Al someter estos materiales a una carga mecánica, esta se transfiere a los áridos y a la matriz cementicia. Comparativamente, la pasta de cemento y la zona interfacial pasta-árido tienen peores

propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta además que la pasta de cemento tendrá un espesor pequeño, esta zona de unión podrá ser una zona preferencial de fallo del material.

En cuanto a su principal característica, la porosidad, este tipo de hormigón ya endurecido presenta poros de diámetros de 2 a 12 mm que permiten que el agua lo atraviese fácilmente. El contenido de vacíos puede variar entre el 15% y 35%. Se considera como un tipo de hormigón ligero, con una densidad entre 1600-2000 kg/m<sup>3</sup>.

Estas características se alcanzan con los siguientes parámetros:

- Esqueleto granular sin árido fino (< 5 mm) y áridos normales o ligeros prácticamente de un solo tamaño (aproximadamente 19 mm).
- Relación cemento/árido en volumen de 1:6 a 1:10.
- Relación agua/cemento entre 0,40 a 0,60.

Debido a que el concreto poroso tiene ausencia parcial o total de finos, y como consecuencia, una elevada porosidad, la resistencia a la flexión y compresión tiende a ser inferior a la de un concreto convencional. La resistencia a compresión oscila normalmente entre 2,8 y 15 MPa de acuerdo al tipo de cemento y árido grueso, y dosificación que se implemente. Experiencias de laboratorio han demostrado que las mejores resistencias se obtienen con relaciones agua/cemento comprendidas entre 0,40 y 0,45. Con relaciones inferiores la pasta se vuelve muy rígida y puede que no envuelva a las partículas de los áridos (Curso de Estudios Mayores de la Construcción, 1998). Por tanto, al momento el criterio de aceptación del hormigón poroso se basa en la porosidad, uniformidad y espesor, a diferencia de la resistencia a compresión en el hormigón convencional.

#### 2.2.4. Aspectos de Puesta en Obra y Trabajabilidad

Una propiedad importante de todo hormigón es la trabajabilidad de la mezcla, que se puede definir como la facilidad con la que el hormigón puede mezclarse, manejarse, transportarse y colocarse en su posición final con una pérdida mínima o nula de homogeneidad.

Los factores más importantes que influyen en la trabajabilidad de una mezcla son la relación agua-cemento, la cantidad de árido fino, la forma y textura de los áridos, la relación entre la cantidad de pasta de cemento y de áridos, la influencia de aditivos en la viscosidad de la pasta y la granulometría de la mezcla.

Al estar el 80% del volumen del hormigón ocupado por áridos (siendo el resto ocupado por la pasta de cemento que rellena los huecos existentes entre ellos), la cantidad de árido fino hacen que las propiedades del hormigón varíen de forma notable, por lo que influyen en gran medida en la trabajabilidad y técnicas de puesta en obra del hormigón.

El hormigón poroso es sensible al desmoronamiento o *Raveling*, que es un fenómeno que se traduce en una pérdida de adherencia entre los áridos y la pasta de la superficie expuesta. El *Raveling* se produce cuando las cargas pesadas se aplican al hormigón permeable. La prevención de la pérdida de agua (por curado) reduce el riesgo de desmoronamiento. Por lo tanto, especial se debe tener especial cuidado durante la etapa de construcción.

La metodología de puesta en obra del hormigón poroso es distinta al concreto tradicional, fundamentalmente porque utiliza un método especial de compactación y porque se debe evitar el

deterioro de la permeabilidad durante la construcción. A continuación se presenta un esquema sobre el procedimiento típico para la puesta en obra de un hormigón poroso.



Figura 2.6. Procedimiento de puesta en obra de un hormigón poroso. 1) Entrega, 2) Ejecución, 3) Nivelación, 4) Compactación, 5) Protección. Fuente: lafarque.com

1. El hormigón se entrega en camión hormigonera listo para su uso, y debe colocarse rápidamente debido al bajo contenido de agua, lo que disminuye el tiempo de fraguado del hormigón.
2. Después de verter el hormigón, se extiende con un rastrillo o una pala lo más uniformemente posible.
3. Se nivela hasta la altura deseada con medios manuales o mecánicos (extendedora o regla).
4. Es preferible reducir al mínimo, o incluso evitar el vibrado para no eliminar la porosidad y evitar segregación. Generalmente se utiliza un rodillo para consolidar el hormigón fresco permitiendo un enlace fuerte entre la pasta y el agregado, y generar una superficie con buen acabado.
5. Se cubre la superficie con una lona de plástico para evitar que el hormigón se seque demasiado rápido.

Por otra parte, opuesto al hormigón poroso, la compacidad es una característica de los hormigones con alto contenido de finos, que se define como el cociente entre volumen real y volumen aparente del hormigón fresco y está relacionada con el nivel de huecos existentes en la mezcla. Un alto nivel de compacidad nos da un hormigón con índice muy reducido de huecos en su granulometría. Esto se refiere, optimizando el contenido de cemento en el hormigón, al intento de establecer la mejor forma de mezclar las partículas de áridos de distintos diámetros para tener la máxima compacidad, es decir el mínimo volumen de aire en el interior.

En las granulometrías que se denominan gruesas, los áridos de mayor tamaño tendrán mayor resistencia a esta mezcla que en los hormigones de granulometría fina. Hay que tener en cuenta

que a igualdad de consistencia, la disminución del porcentaje de finos de la arena supone una disminución media del 1,2% en la densidad, o lo que es lo mismo 12 litros de aire ocluido por metro cúbico: una mayor porosidad y por consiguiente una menor compacidad (Aguado & Agulló, 2011).

Otra característica importante de los hormigones con alto contenido de finos, es su elevada manejabilidad o docilidad, propiedad que se define como la idoneidad de un hormigón para adaptarse a formas determinadas con los medios de compactación de los que se disponga. La presencia de finos favorece la manejabilidad de los hormigones, ya que se reduce la porosidad al rellenar los huecos que quedan entre los áridos grandes, adaptándose mejor así a cualquier forma que le quiera dar al producto acabado (Aguado & Agulló, 2011).

Entonces, en el caso del hormigón poroso, debido a la falta de árido fino y a una consistencia más bien seca, presenta una trabajabilidad dificultosa en comparación con el hormigón convencional y otros hormigones con elevado contenido de árido fino como son los hormigones autocompactantes. Esto provoca inconvenientes en el transporte, compactación y curado. En resumen, imposibilita aplicar nuevas técnicas de puesta en obra de los hormigones porosos, pero se traduce en la elevada porosidad que interesa de este tipo de hormigón.

### 2.3. ESTUDIOS REALIZADOS PARA MEJORA DE LAS PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES POROSOS

Según lo expuesto anteriormente, el hormigón poroso presenta dos principales limitantes, una en cuanto a que presenta peores propiedades mecánicas debido a la porosidad, y por otro lado presenta inconvenientes al momento de su puesta en obra. Por lo que en los últimos años se han desarrollado estudios en busca la mejora de estas propiedades de los hormigones porosos. Se ha buscado fundamentalmente, mediante el aumento de superficie de interacción pasta-árido o la mejora de la resistencia de la pasta de cemento (Yang & Jiang, 2003), siendo estas las líneas fundamentales de investigación durante los últimos 40 años. De forma concreta, en la bibliografía consultada se han encontrado referencias a las siguientes cuestiones (Gerharz, 1999), (Yang & Jiang, 2003), (Huang, et al., 2010), (Lian & Zhuge, 2010), (Bhutta, et al., 2011), (Deo & Neithalath, 2011):

- Optimización de la dosificación, para obtener una compacidad mejorada y modificar el área de interacción pasta-árido.
- Utilización de adiciones (humo de sílice, cenizas volantes, microsílíce, etc.), para mejorar las características mecánicas de la pasta de cemento.
- Utilización de aditivos superplastificantes, para lograr una adecuada trabajabilidad de las mezclas.
- Utilización de aditivos cohesionantes, para evitar la segregación de los áridos.
- Utilización de compuestos poliméricos (resinas poliméricas, látex, emulsiones acrílicas), para mejorar el cohesionado de los áridos y mejorar las propiedades mecánicas.

En algunos de los ejemplos citados anteriormente (Bhutta, et al., 2011) fue posible mejorar la trabajabilidad del material y la resistencia del material, permitiendo incluso la obtención de hormigón autocompactante, como puede verse en la Figura 1.4.



Figura 2.7. Comparación entre el cono y la fluencia de un hormigón poroso convencional (CPC) y un hormigón poroso de propiedades mejoradas (HPPC) (Bhutta et al. - 2011).

## 2.4. PROPUESTA CIENTÍFICA

### 2.4.1. Técnica para la Obtención de Materiales con Porosidad Controlada

La industria cerámica utiliza desde hace ya tiempo un procedimiento interesante y eficaz para la fabricación de materiales con porosidad controlada, empleando las llamadas plantillas de sacrificio (sacrificial templating) para conseguir materiales cerámicos con macro y microporosidad, introduciendo materiales orgánicos de diversas procedencias (celulosa, lignina, poliestireno expandido, etc.) y con diferentes morfologías (fibras, microcristales, polvo), para conseguir materiales cerámicos con una porosidad controlada (entre un 60% y 90%, con tamaños máximos de poro de 250  $\mu\text{m}$ ) y permeabilidad mejorada, manteniendo unas propiedades mecánicas adecuadas (Lopes & Segadaes, 1996), (Androff, et al., 1997), (Peng, et al., 2000), (Okada, et al., 2009).

En la Figura 2.6 puede verse una imagen obtenida por tomografía computarizada de rayos-X, de una muestra de cerámica altamente porosa (porosidad > 50%) obtenida a partir de celulosa (Fey, 2012).

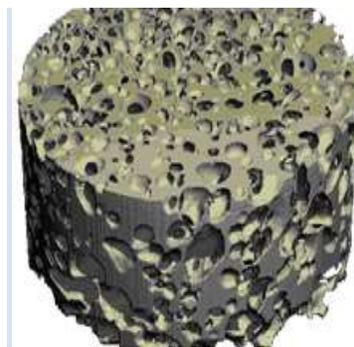


Figura 2.8. Imagen obtenida por tomografía computarizada de rayos-X de una cerámica altamente porosa obtenida a partir de celulosa (Fey - 2012).

El empleo de las plantillas de sacrificio en las cerámicas se fundamenta en la calcinación de las mismas durante el proceso de sinterización de la cerámica. A las temperaturas habituales de sinterización (entre 1200° y 1500° C), la materia orgánica presente en el material en verde se calcina por completo, dejando poros.

En el caso del hormigón no es posible emplear estas temperaturas, dado que el material se vería totalmente degradado, pero es posible aprovecharse de una característica inherente del mismo: su elevada alcalinidad.

Las diversas reacciones y productos generados en la hidratación del cemento portland, acaban generando un medio con una elevada alcalinidad, caracterizado por un elevado pH en torno a 13,5, y una concentración de álcalis (fundamentalmente Sodio Na<sup>+</sup> y Potasio K<sup>+</sup>) muy elevada. En estas condiciones, diversos compuestos pueden ser disueltos, de tal modo que el proceso se asemejaría a la utilización de plantillas de sacrificio en las cerámicas.

#### 2.4.2. Materiales Solubles en Medios Alcalinos

Teniendo en cuenta lo anterior, se han seleccionado una serie de compuestos, en función de su capacidad de disolución en medios alcalinos como el generado por la hidratación del cemento, como son:

- Arcillas, como la zeolita y la sepiolita
- Polímeros termoplásticos
- Fertilizantes nitrogenados, como la urea
- Polisacáridos, como el almidón, la celulosa y derivados de guar

El comportamiento de cada compuesto será diferente, por tanto el enfoque variará. En la mayor parte de los casos se considerará la introducción del árido de modo sólido, variando el tamaño del mismo.

##### Arcillas

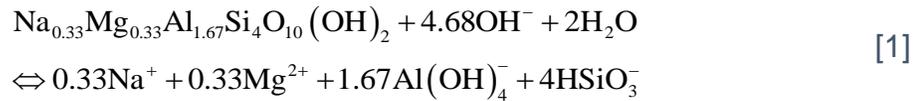
La utilización de diversos tipos de arcillas en los materiales cementicios es una práctica habitual, ya que de modo general presentan propiedades puzolánicas y pueden generar productos de hidratación similares a los del cemento.

Las interacciones cemento-arcillas han sido ampliamente estudiadas, tanto desde el punto de vista de utilización de las mismas como adición al hormigón, como de la interacción del hormigón con formaciones geológicas (Gaucher & Blanc, 2006). En este sentido, se han seleccionado dos tipos de arcillas que presentan una buena solubilidad en los medios cementantes: Zeolita y Sepiolita.

La zeolita, suele estar combinada con cantidades importantes de montmorillonita que es un filossilicato que forma cristales microscópicos formando una arcilla, disolviéndose completamente al entrar en contacto con los medios alcalinos generados por la hidratación del cemento.

En la ecuación [1] se muestra el proceso químico de disolución de la montmorillonita, la cual precisa 4.68 moles de OH<sup>-</sup>; hay que tener en cuenta que, en condiciones normales, 1 m<sup>3</sup> de hormigón genera

8000 moles de OH<sup>-</sup>, de tal modo que la disolución del material está favorecida, si bien será una cuestión de cinética.



La cinética de la disolución puede ser controlada mediante la variación del pH y la temperatura, de tal modo que el aumento de ambos aumenta la cinética de disolución (Gaucher & Blanc, 2006). La disolución de la montmorillonita genera productos de hidratación similares a los que se encuentran en las matrices cementicias, los cuales podrían contribuir a un posterior reforzamiento de la pasta de cemento, incrementando las propiedades mecánicas finales.

#### Polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos elegidos derivan de la familia de los acrilatos y metacrilatos, tratándose de un compuesto comercial suministrado por la compañía BellandTechnology AG, con sede en Alemania. Los citados polímeros acrílicos tienen la propiedad de ser insolubles en medios acuosos neutros y solubles en medios alcalinos, gracias a la presencia de grupos ácido en los monómeros que forman el polímero, como se muestra en la ecuación [2].



No se ha encontrado bibliografía específica sobre el proceso de disolución en medios alcalinos de los polímeros Belland, si bien estudios en poliacrilamida indican que la hidrólisis alcalina puede verse inhibida por efectos de repulsión electrostática entre los grupos -COO- formados durante el proceso de disolución y los iones hidróxido, limitando la solubilidad de los polímeros al 50%.

Así mismo, tampoco se ha encontrado bibliografía específica sobre el efecto de la adición de los polímeros Belland en los procesos de hidratación del cemento, si bien los estudios realizados con diversos tipos de polímeros acrílicos indican que se produce un retardo en las reacciones de hidratación del cemento (Almeida & Sichieri, 2006).

#### Fertilizantes nitrogenados

Son los fertilizantes más utilizados en agricultura debido a que reúnen las ventajas de contener nitrógeno nítrico, de disponibilidad inmediata, y nitrógeno amoniacal, de acción más lenta y prolongada ya que debe sufrir el proceso de nitrificación. El amoníaco constituye la base para la producción de los fertilizantes nitrogenados. La naturaleza polar del enlace N-H (nitrógeno-hidrógeno), forma compuestos polares capaces de formar puentes de hidrógeno, lo que los hace altamente solubles en medios acuosos y alcalinos.

Se ha seleccionado la Urea, uno de los fertilizantes nitrogenados más comunes. No se ha encontrado en la literatura estudios en el que haya utilizado la urea para obtener porosidad en morteros. Se ha encontrado un estudio en donde se han aprovechado las propiedades químicas de la urea para un efecto contrario al buscado en el presente estudio que consiste en la colmatación de poros en morteros de cemento (Pazos, et al., 1992).

Basados en los principios del producto de solubilidad, se rellenan los poros de las probetas de mortero de cemento por impregnación con dos sales que forman otra insoluble. Se emplean sales cálcicas como impregnantes, y urea, oxalato sódico y azúcar como precipitantes, obteniéndose en cada caso las correspondientes ocupaciones de poros que dependen, por lo general, del número de tratamientos y, en particular, de la temperatura de secado.

### Polisacáridos

Los polisacáridos son polímeros cuyos constituyentes (sus monómeros) son monosacáridos, los cuales se unen repetitivamente mediante enlaces glucosídicos (enlace mediante el cual un glúcido se enlaza con otra molécula). De forma general, diversos polisacáridos modificados son usados como aditivos en hormigón, dadas sus características como superplastificantes, controladores del fraguado, etc. (Ramachandran, 1995). En ambos casos, el monómero fundamental es la glucosa. Los polisacáridos elegidos son el almidón y la celulosa.

El almidón ha sido seleccionado por la actual proliferación de productos de almacenaje biodegradables (biodegradable packing peanuts). El almidón no es soluble en agua, pero sufre un proceso denominado gelificación, por el cual se produce la lixiviación de la amilosa, favoreciendo la hidratación del resto de moléculas. Por el contrario, es posible lograr una solubilización casi completa del almidón en medios alcalinos, por medio de acciones mecánicas (Han & Lim, 2004).

Pequeñas adiciones de almidón a materiales cementicios producen una fuerte modificación de los procesos de hidratación, ralentizándolos (Peschard, et al., 2004). No está muy claro el mecanismo de influencia, si bien parece que influye en los procesos de hidratación del aluminato tricálcico (C3A). Diversos derivados del almidón son utilizados para mejorar la consistencia del hormigón.

La celulosa es insoluble en agua, dado que se forman puentes de hidrógeno entre las diferentes moléculas de glucosa que forman parte de las cadenas lineales. La fuerza de estos enlaces hace que el proceso de hidrólisis de la celulosa sea complicado incluso en medios alcalinos, si bien estos medios favorecen la disminución del grado de polimerización y, por tanto, su disolución (Toledo, et al., 2000)

Es ampliamente conocida la degradación que causa en las fibras de celulosa el medio generado durante la hidratación del cemento; así mismo, se sabe que el principal producto generado por la disolución de la celulosa en un medio que simula el hormigón, es el ácido isosacarínico y otros ácidos en forma minoritaria. La cinética de la disolución de la celulosa pura en los materiales cementicios es bastante lenta, si bien depende en gran medida del grado de polimerización (Loon & Glaus, 1997)

El efecto del azúcar (mezcla de glucosa y fructosa) en el hormigón es ampliamente conocido, retardando los procesos de hidratación. Dependiendo de las características (si es azúcar, y de su concentración), la ralentización de los procesos de hidratación variará (Juenger & Jennings, 2002). Si bien el proceso no es bien conocido, se acepta de modo general que la ralentización de los procesos de hidratación tiene lugar por la absorción del azúcar tanto en la superficie de los granos de cemento anhidro, como en los productos de hidratación (Juenger & Jennings, 2002).

La goma guar es el polisacárido de reserva nutricional de las semillas de *Cyamopsis tetragonoloba*, una planta de la familia de las leguminosas. El polisacárido de la goma guar es soluble en agua. Se usa principalmente en la industria alimentaria, en zumos (jugos), helados, salsas, comida para

mascotas, panificación. La harina obtenida del grano de *Cyamopsis tetragonoloba* se usa como agente espesante. En la bibliografía consultada se ha encontrado que se han utilizado derivados de guar como aditivos para mejorar las propiedades de durabilidad de las muestras frente a ciclos de hielo/deshielo de los morteros de cal (Álvarez, 2014).

## 2.5. DISCUSIÓN

De acuerdo a lo planteado dentro del presente capítulo, el tamaño de los áridos que entran en la composición de un hormigón, influyen de forma notable en las propiedades del mismo. La presencia de árido fino proporciona al hormigón una consistencia fluida, una mayor docilidad o manejabilidad y el aumento de la compacidad de la mezcla, características que no posee el hormigón poroso, ya que se hace necesario prescindir de áridos finos en busca de obtener mayor porosidad. La ausencia o poca presencia de finos, deprime en gran medida la manejabilidad del hormigón poroso, esto hace que éste no pueda ser autocompactante.

Como hemos citado anteriormente, los estudios en busca del mejoramiento de las limitantes de resistencia y trabajabilidad que presenta el hormigón poroso, se han basado en la optimización de la dosificación y utilización de adiciones y aditivos.

De ahí que resulte interesante plantearse la posibilidad de desarrollar una nueva gama de hormigones basándose en la implementación de un nuevo árido que sea soluble dentro de la matriz del hormigón, dando mejores características de resistencia y versatilidad en términos de la puesta en obra, pero posibilitando un grado importante de porosidad dentro de la estructura del hormigón, al estar presente durante la puesta en obra y luego desaparecer dejando poros internos interconectados.

Este hecho haría posible conseguir nuevas aplicaciones para el hormigón poroso en el sector de la construcción que contribuyan a la disminución del impacto ambiental de futuras construcciones, mediante el aprovechamiento de las ventajas que presentan los hormigones porosos para la construcción sostenible.

## CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Una vez planteados en el capítulo anterior los temas que ponen en contexto esta investigación, se dispone el presente capítulo para describir las actividades de experimentación realizadas durante el desarrollo de la misma. Así, el objetivo de este capítulo es describir la campaña experimental seguida para realizar los estudios en torno al desarrollo de áridos solubles en medios alcalinos, que ha quedado dividida en cuatro fases, a través de las que se fue descartando materiales de acuerdo a su comportamiento durante los diferentes ensayos y evaluaciones.

Así, la primera fase ha sido destinada a caracterizar la cinética de disolución de los materiales seleccionados para estudiarse como árido soluble, etapa que consiste en exponer los áridos a un medio que simule las condiciones de alcalinidad generadas por la hidratación de los compuestos cementicios durante un tiempo, para determinar la cantidad de masa disuelta vs tiempo. Luego en la segunda fase se ha buscado identificar las consecuencias de la interacción entre dichos materiales y pastas de mortero de cemento portland y arena. En la tercera fase se han evaluado cuatro aditivos inclusores de aire, observando la distribución y tipo de burbuja que genera en el mortero y sus efectos sobre la densidad, porosidad accesible al agua y resistencia de las mezclas, a manera de determinar cuáles serían los aptos, para complementar los morteros porosos y autocompactantes buscados.

Y finalmente en la cuarta fase se han evaluado los materiales que resultaron tener el mejor comportamiento, según las evaluaciones realizadas en las tres fases anteriores. En donde, se han propuesto diferentes combinaciones y dosificaciones de morteros - aditivo aireante - árido soluble, a manera de ampliar la investigación en cuanto a variables como la consistencia, tiempo de fraguado, densidad, porosidad accesible al agua y resistencias de dichos morteros.

Así, en una primera parte de este capítulo se presenta un esquema para dar una descripción breve y gráfica de toda la metodología experimental seguida, para el mejor entendimiento de las subsiguientes descripciones de cada fase de investigación.

### 3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental realizado durante este proceso investigativo dividido en cuatro fases se plantea en forma resumida y esquemática en la siguiente Figura 3.1, presentando cada fase, los materiales estudiados y las observaciones y/o ensayos que se han realizado en cada fase.

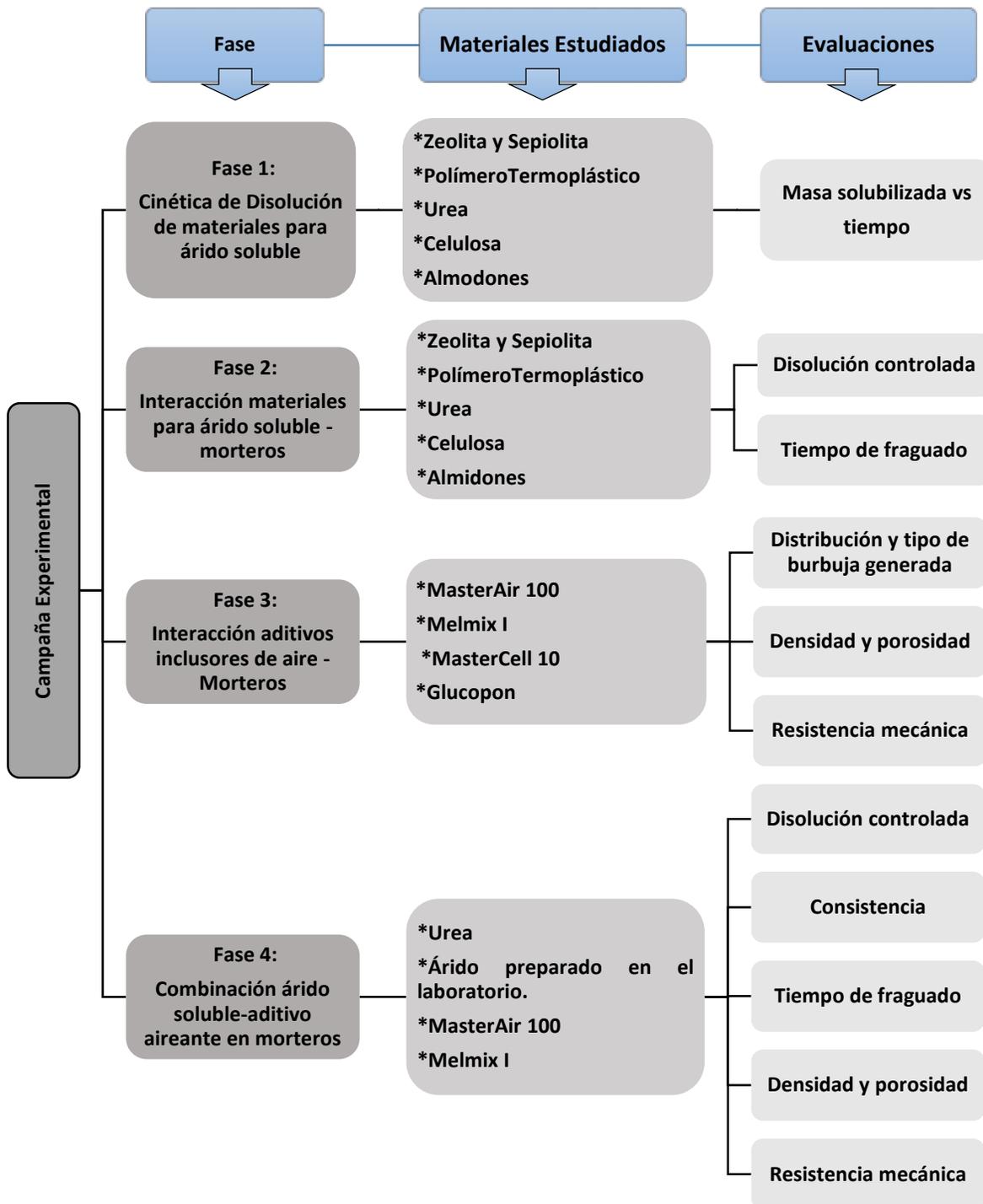


Figura 3. 1. Esquema del proceso experimental

### 3.3. FASE 1: EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE DISOLUCIÓN

#### 3.3.1. Metodología

La cinética de disolución del material seleccionado para ser objeto de estudio como árido soluble en el hormigón es la característica fundamental para su empleo como árido soluble. Para determinar lo anterior, se han realizado ensayos de disolución en un ambiente que simulan el medio alcalino generado por los materiales cementicios. Dicho ambiente se ha generado con la preparación de una solución alcalina acuosa, en la cual han sumergido por un tiempo determinado 6 materiales, que han sido objetos de estudio como árido soluble de esta Fase 1. Así, el ensayo se ha realizado tomando como solutos los materiales descritos en el Apartado 3.3.2, y como solvente la solución compuesta por 2 bases químicas fuertes descritas en el Apartado 3.3.3.

#### 3.3.2. Materiales para el Árido Soluble

Los materiales objeto de estudio para esta fase, como candidatos a ser un árido soluble, fueron seleccionados acorde a la posibilidad de su disolución en medios fuertemente alcalinos, según lo planteado en el Apartado 2.4.1. En la siguiente Tabla 3.1., se muestra la lista de materiales seleccionados:

Naturaleza	Materiales para Árido Soluble
Arcillas	1) Zeolita
	2) Sepiolita
Polímero termoplástico	3) Polímero termoplástico Belland Polymer
Fertilizante nitrogenado	4) Urea industrial
Polisacáridos	5) Celulosa
	6) Almidón industrial modificado en laboratorio

Tabla 3. 1. Materiales para ser estudiados como árido solubles en la Fase 1.

##### 3.3.2.1. Zeolita

La zeolita es de la familia de las arcillas y tiene en su estructura molecular tres componentes relativamente independientes: aluminosilicatos; cationes intercambiables y agua zeolítica. La muestra estudiada de zeolita fue suministrada por la empresa Zeocat. Se trata de Zeolita Natural Agro, compuesta fundamentalmente por clinoptilolita granulada, montmorillonita, feldespatos, moscovita y cristobalita (Anexo A). Las muestras de zeolita eran tres, posee una granulometría de 0,5 a 1 mm (Figura 3.2).



Figura 3. 2. Muestras de Zeolitas de 0,5 a 1 mm.

### 3.3.2.2. Sepiolita

La sepiolita, al igual que la zeolita, es de la familia de las arcillas. Está presente en la naturaleza en dos formas diferentes:  $\alpha$ -sepiolita, que tiene un alto contenido de fibras cristalinas en su estructura; y  $\beta$ -sepiolita, que son como pequeñas partículas redondeadas. Las muestras estudiadas de sepiolita fueron suministradas por la empresa Lorda y Roig mostrada en la Figura 3.3. Se trata de muestras de Sepiolita 15-30 (Anexo B). La muestra disponible de sepiolita, presentaba una granulometría similar a la granulometría intermedia de la muestra de zeolita.



Figura 3. 3. Aspecto visual de la sepiolita estudiada

### 3.3.2.3. Polímero termoplástico

El polímero termoplástico estudiado fue suministrado por la compañía Belland Polymers, denominándose Belland Polymer compuesto de productos hidrófobos e hidrófilos, de tal forma que es resistente al agua natural y soluble en soluciones alcalinas. El suministrador no aportó ficha técnica del producto.



Figura 3. 4. Aspecto visual del polímero termoplástico objeto de estudio.

### 3.3.2.4. Urea

Se ha utilizado urea granular ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ), conocida también como urea cristalina, urea industrial o urea de alimentación animal proporcionada por la compañía FERTIBERIA. S.A (Anexo C). Es un sólido blanco inodoro con un pH en solución acuosa (100g/l) a  $20^\circ\text{C}$ , con una densidad aparente a  $20^\circ\text{C}$  de 700-800  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Es extremadamente soluble en agua (1.190  $\text{gr}/\text{l}$ ). Tiene una peculiar característica de calor de disolución endotérmica en agua de 57,8  $\text{cal}/\text{gr}$ . Su granulometría oscila entre los 2,36 y 1 mm.

Tiene aplicaciones como fertilizante nitrogenado, en formulación de mezclas, como sustancia intermedia en diversos procesos industriales, como aditivo de proceso como agente auxiliar, producto químico de laboratorio, producto de limpieza, aditivo para alimentación animal, tratamiento y reducción de óxidos nitrosos, y también en cosmética.



Figura 3. 5. Aspecto visual de la muestra de urea estudiada

#### 3.3.2.5. Celulosa

La celulosa es uno de los principales biopolímeros. Es un polímero ampliamente conocido debido a su elevada disponibilidad, su biocompatibilidad, su potencial de biodegradación y su sustentabilidad. Tiene una estructura molecular derivada de su origen biológico, formada por nano fibras. Las muestras de celulosa fueron suministradas por la empresa Torraspapel, en forma de láminas de pasta de papel seca. A partir de esas muestras, empleando un proceso de trituración mecánica, se prepararon las muestras para los ensayos.



Figura 3. 6. Muestra de celulosa estudiada

#### 3.3.2.6. Almidón industrial modificado

El almidón industrial es un polímero natural en base de almidón, con un bajo peso específico y una elevada porosidad, presentando una velocidad de disolución muy elevada. Las muestras ensayadas fueron suministradas por la empresa Ratioform. Se trata de muestras de Flo-Pak BIO, empleadas para el almacenaje y transporte, compuestas de maíz y agua. Se producen por extrusión a alta presión y elevada temperatura. La Figura 3.7.a presenta una foto del polímero como fue suministrado.

Debido a la elevada porosidad de este material, su disolución completa no tarda más que segundos en presencia de agua. De tal forma que es imposible fabricar morteros con ese material. A raíz de lo

anterior, se decidió proceder a la fabricación de muestras de almidón modificado, para realizar los ensayos de la campaña experimental.

En la Figura 3.7.b está ilustrado el almidón modificado producido en el Laboratorio de Tecnología de Estructura de la UPC. Para la producción de este polímero fue empleadas distintas concentraciones de almidón, teste con compuestos minerales (que elevaban la resistencia) y agua. Exponiendo a diferentes temperaturas por periodos de tiempo pre determinados. Hasta llegar a un resultado considerable, pero todavía presentado baja porosidad.

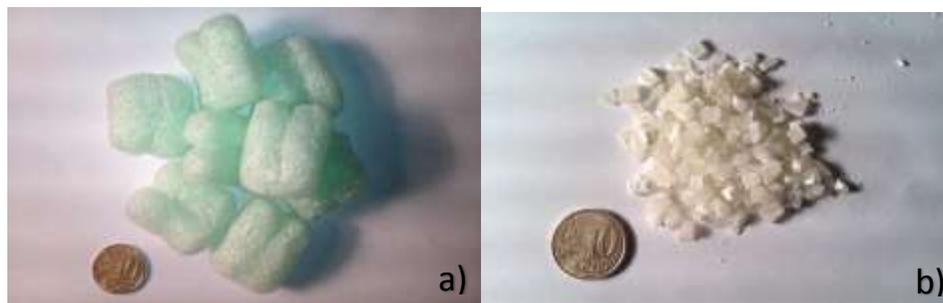


Figura 3. 7. Aspecto visual a) almidón industrial y, b) almidón modificado

### 3.3.3. Materiales para la Solución Alcalina

Se ha preparado una mezcla de bases químicas fuertes, que dan como resultado una solución fuertemente alcalina con un elevado PH de 13, para simular el medio de disolución del hormigon. Las bases mezcladas fueron las siguientes:

#### Hidróxido de Potasio

El hidróxido de potasio (KOH) utilizado para la solución alcalina es una base fuerte de uso comúnmente industrial, ha sido proporcionado por Sigma-Aldrich Química, S.L., este reactivo para laboratorio fuertemente alcalino con un pH de 13,5 fue proveído en forma de gránulos, con una densidad aparente de 1.300 kg/m<sup>3</sup> y con una solubilidad en agua de 1.120 g/l – soluble.

#### Hidróxido de Sodio

El hidróxido de sodio (NaOH), usado como reactivo de laboratorio para la fabricación de la solución alcalina, proveído por la misma empresa Sigma-Aldrich Química, S.L, en forma de gránulos blancos e inodoros, consta de un pH de 14 a 20°C, con una densidad aparente de 1.150 kg/m<sup>3</sup> y con una solubilidad en agua de 1.260 g/l a 20°C.

### 3.3.4. Preparación y Condiciones de Conservación de las Muestras

La disolución empleada como solvente para realizar la simulación del medio alcalino ha constado de la siguiente composición: 2,6 gramos de hidróxido de sodio / 1 litro de agua destilada y 9 gramos de hidróxido de potasio / 1 litro de agua destilada. Así, ha resultado una concentración de 0,16 moles hidróxido de potasio, 0,065 moles de hidróxido de sodio, alcanzando un pH final la solución de 13,5. Para cada material estudiado como soluto, se han empleado recipientes de vidrio con 100 ml de la solución alcalina, a los que se adicionarán 10 gramos de cada material para árido soluble estudiado (Tabla 3.1.). Los recipientes fueron conservados en condiciones controladas de temperatura, 20 ± 1 °C, y humedad, 65 ± 5% HR.

Mediante la observación del comportamiento del material dentro de la disolución alcalina se establecen diferentes tiempos de exposición (minutos, horas, días, semanas) a dejar la muestra, para obtener diferentes puntos de evaluación en el tiempo.

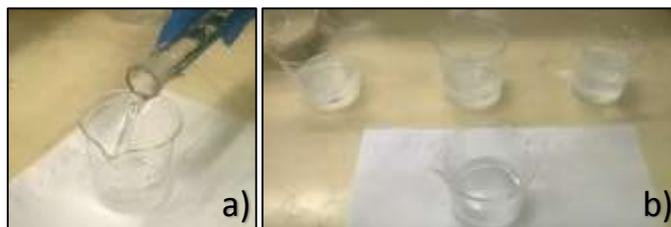


Figura 3. 8. Preparación de las muestras para la disolución del árido soluble. a) depósito de la solución alcalina, b) depósito del soluto (en este caso Urea).

### 3.3.5. Ensayo de Caracterización de la Cinética de Disolución

Para determinar la evolución del proceso de solubilización se ha controlado la pérdida de masa en función del tiempo de exposición a la solución alcalina de cada material estudiado como arado soluble. La primera medición de pérdida de masa se ha realizado en función del comportamiento del soluto observado, dependiendo de la rapidez con que se disuelva el material.

Para realizar la medición de la masa, se filtra el contenido que resta luego del tiempo de exposición. El material que quede retenido en el tamiz es lavado, para así retirar los productos de la solución envueltos en los granos. Tras ese proceso, la muestra es secada en horno a una temperatura de  $100 \pm 5$  °C, (en el caso de la urea fueron secadas al aire).



Figura 3. 9. Proceso de ensayo para determinar la cinética de disolución de las muestras (en el caso de la urea), a) filtrada, b) secada, c) pesada.

Con una serie de mediciones de la diferencia de peso final vs el peso final, se genera una curva del porcentaje de pérdida de masa de cada material por el tiempo. El análisis de esa curva es fundamental como parámetro de definición de la idoneidad de cada material estudiado.

## 3.4. FASE 2: ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ÁRIDO SOLUBLE- MORTEROS

### 3.4.1. Metodología

Esa fase ha sido de aspecto cualitativo, para verificar la interacción de los materiales objeto de estudio con morteros. Así, el objetivo de esta fase ha sido identificar la capacidad de solubilidad de

los materiales que han sido seleccionados para estudiarse como áridos solubles, y su influencia sobre el tiempo de fraguado y efectos colaterales de los morteros, para así aceptar o descartar el material como candidato a ser utilizado como árido, y como objeto para continuar la investigación.

Para ello, se han fabricado morteros de arena y cemento portland, siguiendo las indicaciones de la norma UNE- EN 196-1:1996. Pero se han añadido los materiales estudiados a diferentes mezclas por separado, a modo de observar lo que sucede con el material añadido durante los diferentes procesos de amasado, fraguado, desmolde y curado de las probetas de los morteros.

### 3.4.2. Materiales para Preparación de los Morteros

#### Materiales Estudiados para el Árido soluble

Estos materiales se encuentran definidos en el Apartado 3.3.2 y reunidos en la Tabla 3.1, en donde se plantean las características de cada una de las seis muestras objetos de estudio.

#### Cemento

El cemento utilizado para la preparación de los morteros es un cemento Portland tipo I, llamado SUPER-DRAGON, fabricado por Cementos Molins Industrial, S.A., de categoría resistente muy alta 52, 5 R. Sus características especiales son: resistencias muy altas, tanto Inicial como final Sus resistencias a compresión a 28 días, le sitúa en la zona alta de los cementos de su categoría. Y el endurecimiento rápido. Este cemento es recomendable para elaborar morteros y hormigones de prestaciones altas y muy altas, así como para confeccionar elementos prefabricados, especialmente de resistencias elevadas en edades tempranas.

#### Arena

La arena utilizada para la preparación de los morteros fue arena de 0, 50 mm de machaqueo calizo de la compañía PROMSA.

#### Aqua

Toda el agua de amasado que utilizada fue agua potable.

### 3.4.3. Dosificación y Preparación de los Morteros.

Consisten en morteros normalizados de cemento Portland y arena en una proporción de 1:3 en volumen, donde la relación agua/cemento empleada fue de 0,5. Pero en estos se sustituyó el 50 % del volumen de la arena por las muestras de cada material soluble objeto de ensayo de la Tabla 3.1, quedando los morteros con la composición mostrada en la siguiente Tabla 3.2:

<b>Mortero con árido soluble</b>	
Material	Peso (gramos)
Cemento	450
Arena	675
Agua	225
Material para árido soluble	675

Tabla 3. 2. Composición de los morteros con material para árido soluble

En el caso de la urea, la idea inicial era sustituir el 50% del árido por urea, pero observando la mezcla quedaba excesivamente fluidas (comportamiento que se esperaba al estar añadiendo esferas), así que al final se incorporó toda la arena, quedando entonces el mortero con la siguiente composición:

Mortero con Urea	
Material	Peso (gramos)
Cemento	450
Arena	1350
Agua	225
Urea	675

Tabla 3. 3. Composición del Mortero con Urea

Se han empleado una metodología de mezcla de los morteros que consiste en la pre-mezcla en seco de los componentes sólidos (cemento, arena y material soluble) utilizando la amasadora de la Figura 3.10 durante unos 30 segundos, para homogenizar la mezcla, tras lo cual se ha procedido al amasado incorporando el agua, amasando 1 minuto. Se dejó reposar por 30 segundos y luego amasando durante 1 minuto más.



Figura 3. 10. Amasadora utilizada para la preparación de los morteros.

#### 3.4.4. Proceso de Fabricación y Curado de las Probetas

Para cada material soluble de la Tabla 3.1., se han fabricado probetas de 40 mm X 40 mm X 160 mm. Las probetas se han enmoldado inmediatamente después del amasado de los morteros vaciando las mezclas con ayuda de una espátula y utilizando una meza vibradora para nivelar la mezcla, con una leve vibración de máximo 5 segundos, ya que se trataba de mezclas muy fluidas.



Figura 3. 11. Enmoldado de probetas

Las probetas han sido desmoldadas en intervalos de tiempo muy variados tras la fabricación, dependiendo del aspecto visual y consistencia de las muestras. Tras el desmolde, el proceso de curado se ha realizado dejando las probetas en un cámara húmeda del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC (Figura 3.12), hasta llegado el momento del ensayo o inspección.



Figura 3. 12. Cámara húmeda del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC

### 3.4.5. Observaciones y Evaluaciones para Descartar Materiales No Idóneos

Durante los diferentes procesos de amasado, curado y desmolde de las probetas de los morteros preparados en esta fase, se han hecho observaciones y evaluaciones para descartar los materiales objetos de estudio de esta fase, que no han presentado un buen comportamiento, tomando las siguientes consideraciones:

#### Disolución controlada en la matriz del mortero

Este es el factor más importante a observar en esta fase, es fundamental que el árido objeto de estudio se disuelva en la matriz de las mezclas cementicias.

#### Tiempo de fraguado

La adición de estos materiales, podrían bien acelerar o retrasar de forma considerable el tiempo de fraguado de las mezclas. Interesa que las probetas hayan fraguado antes de las 24 horas, de lo contrario se consideraría el material añadido como retardador del fraguado.

#### Efectos secundarios por la adición de los materiales solubles en los morteros

Se ha observado también, los efectos colaterales que puedan generar estos materiales sobre los morteros, que presenten características no típicas que las mezclas cementicias normalizadas comúnmente conocidas.

## 3.5. FASE 3: ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN ADITIVOS AIREANTES-MORTEROS

### 3.5.1. Metodología

A manera de corregir las debilidades que mostrarían las mezclas durante las evaluaciones de las fases anteriores, se ha considerado la utilización de aditivos inclusores de aire. Así, el objetivo principal de estas series de observaciones y ensayos ha sido identificar el tipo y distribución de las burbujas generadas por la incorporación de cuatro tipos de aditivos inclusores de aire en la estructura de diferentes morteros.

También, se evalúan otras variables en cuanto a densidades, porosidad y resistencias de las mezclas, comparándolas con un mortero normalizado de referencia. Para ello, se han fabricado las mezclas siguiendo el mismo procedimiento de la fase anterior, según la norma UNE- EN 196-1:1996, pero

incorporando los aditivos a morteros de arena, cemento y agua. Para así, determinar cuáles serían los más adecuados para complementar las mezclas a las que pretende añadirse el árido soluble.

### 3.5.2. Aditivos Incluidores de Aire Estudiados

Se han utilizado 4 aditivos aportadores de aire en la preparación de los morteros de arena y cemento, sin estar combinados con el material soluble, los 3 primeros suministrados por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L., y el último por Cognis Iberia, S.L.:

#### Master Air 100

El Master Air 100 es un agente inclusor de aire para hormigones y morteros. Su actividad se basa en la incorporación de micro-burbujas de aire de tamaño controlado y con un efectivo factor de espaciado, que se mantienen estables en el estado endurecido, proporcionado al hormigón o mortero aditivado una mejora en la trabajabilidad y docilidad (Anexo D).

#### Melmix I

Otro aditivo utilizado es el Melmix I, es un aditivo aireante/plastificante presentado en forma líquida que mejora la trabajabilidad y docilidad del mortero aditivado. Reduce la cantidad de agua de amasado necesaria, disminuyendo el riesgo de fisuras y eflorescencias. Las microburbujas de aire introducidas en el mortero, proporcionan, en estado endurecido, una reducida absorción capilar y un aumento de la durabilidad frente a las heladas (Anexo E).

#### MasterCell 10

Este aditivo es un generador de espuma que se utiliza para la preparación de morteros de bajas densidades ya que actúa ocluyendo una gran cantidad de aire estabilizado. Con este aditivo se consiguen hormigones tan ligeros que pueden flotar por encima del agua (Anexo F).

#### Glucopon 215 CS UP

También se ha utilizado Glucopon 215 CS UP, es una solución acuosa a base de alcohol graso natural, actúa como un agente espumante para limpiadores neutros y sustancias altamente alcalinas (Anexo G).

En el caso de los aditivos Glucopon 215 y el MasterCell 10 se suelen emplear para hacer hormigón celular, y la concentración comercial es del 60%, como han sido utilizados para fabricar morteros, estos fueron diluidos hasta el 30%.

### 3.5.3. Dosificación y Preparación de los Morteros

Se ha preparado un mortero normalizado consistente en una mezcla de cemento y arena en una proporción de 1:3 en volumen con una relación agua/cemento de 0,5. Su composición se muestra en la Tabla 3.4, a continuación:

<b>Mortero Normalizado</b>	
Materiales	Peso (gramos)
Cemento	450
Arena	1350
Agua	225

Tabla 3. 4. Composición del mortero de referencia

Los morteros preparados con los aditivos aireantes, se ha añadido un 0,4% sobre el peso de cemento, se han compuesto como se muestra en la siguiente Tabla 3.5.

Morteros con Aditivos	
Materiales	Peso (gramos)
Cemento	450
Arena	1350
Agua	225
Aditivo	1,8

Tabla 3. 5. Composición de morteros con aditivos inclusores de aire

Como en la fase anterior, en los morteros aditivados se ha hecho la mezcla siguiendo las indicaciones de la norma UNE- EN 196-1:1996, utilizando la amasadora durante unos 30 segundos, para homogenizar la mezcla en seco, tras lo cual se ha procedido al amasado incorporando el agua, amasando 1 minuto. Se dejó reposar por 30 segundos y luego amasando durante 1 minuto más. Pero, en el caso de los morteros aditivados, se ha mezclado el aditivo con el agua de amasado previo a la incorporación en la mezcla.

#### 3.5.4. Proceso de Fabricación y Curado de las Probetas

El proceso de fabricación y curado es el mismo utilizado en la fase anterior, descrito en el Apartado 3.4.4. Para cada tipo de aditivos se han fabricado probetas de 40 mm X 40 mm X 160 mm. Las probetas se han enmoldado inmediatamente después del amasado de los morteros vaciando las mezclas con ayuda de una espátula y utilizando una meza vibradora para compactar con una leve vibración que no necesito más de 5 segundos.

Las probetas han sido desmoldadas en intervalos de 24 a 48 horas tras la fabricación, en base al aspecto visual y consistencia de las muestras. Tras el desmolde, el proceso de curado se ha realizado dejando las probetas en un cámara húmeda del laboratorio de la UPC, hasta endurecer.

#### 3.5.5. Observaciones y Ensayos para Evaluar la Idoneidad de los Aditivos

##### 3.5.5.1. Distribución y Tipo de Burbuja Generada

Luego de la rotura mecánica de las probetas, se han tomado fotografías a nivel microscópico de la estructura interna de las probetas de los morteros aditivados, utilizando una cámara fotográfica adaptada al microscopio de la Figura 3.13, a manera de observar la distribución y heterogeneidad de las burbujas generadas por cada uno de los cuatro aditivos utilizados. Y así determinar el más adecuado para los estudios posteriores.



Figura 3. 13. Microscopio utilizado para evaluar la estructura de los morteros con aire ocluido

### 3.5.5.2. Determinación de las Densidades y Porosidad Accesible al Agua de los Morteros

En esta fase también se ha determinado la densidad seca y aparente, y porosidad accesible al agua de los morteros endurecidos siguiendo el procedimiento planteado en la Norma UNE 83980, el cual utiliza la absorción de agua mediante ebullición o vacío y pesada hidrostática de las probetas, después de acondicionarlas hasta peso constante a baja humedad, una vez saturada en agua la muestra. Este procedimiento se ilustra en las Figuras 3.14, y se describe a continuación:



Figura 3. 14. Proceso de ensayo para determinar densidades y porosidad accesible al agua, a) peso seco, b) saturación por inmersión, c) peso tras saturación por ebullición, d) peso aparente

Antes de iniciar el ensayo, se deben acondicionar previamente las probetas por secado en estufa de laboratorio a una temperatura entre 100 °C y 110°C durante un mínimo de 24 h. Luego se han de determinar cuatro medidas de pesos:

Medida de peso seco ( $m_1$ ): El peso seco de la probeta,  $m_1$ , se determina después del acondicionamiento, dejando enfriar a una temperatura de 20 °C las probetas y pesando en la balanza, como se muestra en la Figura 3.14.a.

Medida del peso tras inmersión ( $m_2$ ): Posteriormente, se sumergen las probetas en agua a  $20 \pm 2$  °C durante 24 horas como se muestra en la Figura 3.14.b, luego se saca la probeta del agua, se elimina con un paño o papel absorbente el agua de la superficie y se pesa.

Medida del peso tras saturación por ebullición ( $m_3$ ): Una vez obtenido el peso de la probeta tras la inmersión, esta se introduce de nuevo en el recipiente con agua, y se deja hervir durante 5 horas. Pasado este tiempo, el agua se deja enfriar, a temperatura ambiente, durante un mínimo de 14 horas hasta alcanzar una temperatura de  $20 \pm 2$  °C. Se elimina el exceso de agua de la superficie de la muestra mediante un paño húmedo y se determina su peso  $m_3$  con la balanza como se observa en la Figura 3.14.c.

Peso aparente ( $m_4$ ): para obtener el peso aparente, debe colocarse la balanza en peso hidrostático. Se engancha una cesta a la balanza, y se sumerge completamente. Luego se tara la balanza e inmediatamente después, se coloca la probeta en el interior de la cesta perforada manteniendo el conjunto sumergido, que no debe tocar ni las paredes ni el fondo, como se observa en la Figura 3.15.d. Luego se determina el peso  $m_4$ .

Los cálculos se realizan, siguiendo las siguientes expresiones:

Absorción después de inmersión:  $\% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100$

Absorción después de inmersión y ebullición:  $\% = \frac{m_3 - m_1}{m_1} * 100$

Densidad en seco,  $\rho_{seca} = \% = \frac{m_1}{m_3 - m_4} * \rho_{agua}$

Densidad aparente,  $\rho_{ap} = \frac{m_1}{m_1 - m_4} * \rho_{agua}$

Porosidad accesible al agua,  $\% = \frac{\rho_{agua} - \rho_{seca}}{\rho_{ap}} * 100 = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_4} * 100$

Donde:

- $m_1$  es el peso seco de la muestra en gramos;
- $m_2$  es el peso de la muestra tras inmersión en gramos;
- $m_3$  es el peso tras ebullición en gramos;
- $m_4$  es el peso aparente en gramos;
- $\rho_{agua}$  es la densidad del agua (1 g/cm<sup>3</sup>);
- $\rho_{seca}$  es la densidad en seco de la probeta, en g/cm<sup>3</sup>;
- $\rho_{ap}$  es la densidad aparente de la probeta en g/cm<sup>3</sup>.

La densidad seca  $\rho_{seca}$  o densidad, es el cociente entre la masa de la probeta seca y el volumen de la parte sólida. El volumen de la parte sólida es la diferencia entre el volumen aparente de la probeta y el volumen de huecos accesibles al agua. La densidad aparente  $\rho_{ap}$  es el cociente entre la masa de la probeta seca y el volumen aparente, que es el volumen limitado por la superficie externa de la probeta incluyendo huecos. Finalmente la porosidad accesible al agua es la relación en porcentaje entre el volumen de poros accesibles al agua y el volumen aparente de la probeta.

### 3.5.5.3. Determinación de la Resistencia Mecánica

Interesa conocer cuales aditivos afectan en mayor o menor medida la resistencia de los morteros, ya que es un factor importante en toda mezcla cementicia que pretenda utilizarse en hormigones. Para hacer estos ensayos, las probetas fueron sacadas de la cámara húmeda unos 15 minutos antes de cada ensayo, las edades de ensayo (calculadas desde el momento de la mezcla hasta el comienzo del ensayo) han sido de 2, 7 y 28 días. Después del tiempo de curado las probetas, se han determinado sus propiedades mecánicas según la norma UNE-EN 196-1-1996, donde se describe un método para determinar las resistencias mecánicas a flexión y compresión de probetas prismáticas de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm.

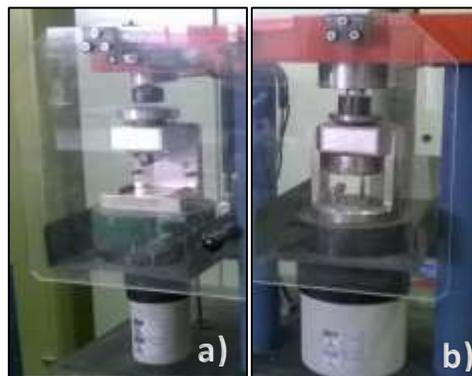


Figura 3. 15. Máquinas de ensayo de resistencia mecánica, a) para ensayo de flexión, b) para ensayo de compresión

– Ensayo de resistencia a flexión:

Para la determinación de la resistencia a flexión se ha utilizado el método de la carga concentrada y centrada por medio de la máquina de ensayo a flexión (Figura 3.15. a). En esta máquina se coloca una cara lateral sobre los rodillos de soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplica la carga verticalmente por los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma e incrementa uniformemente a una velocidad de 50 N/s  $\pm$  10 N/s hasta rotura.

La resistencia a flexión se obtiene con la siguiente fórmula  $R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b^3}$ . Siendo:

$R_f$  Es la resistencia a flexión (en newton por milímetros cuadrados);

$b$  Es el lado de la sección cuadrada de prisma (en milímetros);

$F_f$  Es la carga aplicada en el medio del prisma en la rotura (en Newton);

$l$  Es la distancia entre soportes (en milímetros).

– Ensayo de resistencia a compresión:

Las porciones de prismas rotos a flexión se ensayan a compresión sobre las caras laterales del moldeo sobre una superficie de 40 mm x 40 mm con la ayuda de la máquina de ensayo de resistencia a compresión (Figura 3.15.b). Se centra cada semiprisma lateralmente con relación a los platos de la máquina y longitudinalmente se forma que la base del prisma no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10 mm. Se aumenta la carga uniformemente, a una velocidad de 2 400 N/s  $\pm$  200 N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.

La resistencia a compresión se obtiene según la fórmula  $R_c = \frac{F_c}{1600}$ . En la que:

$R_c$  Es la resistencia a compresión (en newton por milímetro cuadrado);

$F_c$  Es la carga máxima de rotura (en newton)

1600 = 40 mm x 40 mm es la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados)

### 3.6. FASE 4: COMBINACIÓN ÁRIDO SOLUBLE-ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE EN MORTEROS

#### 3.6.1. Metodología

El objetivo de esta serie de ensayos ha sido identificar las consecuencias de la incorporación en morteros de la urea como material soluble, en combinación con los aditivos inclusores de aire que ha mostrado un mejor comportamiento para los fines de esta investigación según las evaluaciones realizadas en las fases anteriores. Además de otros tres materiales preparados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC, a base de almidón y otros dos polisacáridos derivados de goma de guar, en cuyo caso los aditivos inclusores de aire se han añadido durante la preparación de dicho material, buscando envolver partículas de arena y cemento.

Se han evaluado en esta fase variables como la solubilidad y consecuencias de la interacción de los materiales objeto de estudio con la matriz de los morteros, la consistencia y el tiempo de fraguado. Además de la densidad seca y aparente, la porosidad accesible al agua y resistencias obtenidas en el caso de los morteros con nuevas dosificaciones urea y aditivos. Para ello, se han fabricado morteros de arena y cemento portland, como en las fases anteriores, siguiendo las indicaciones de

la norma UNE- EN 196-1:1996, pero añadiendo la urea o los materiales preparados en el laboratorio, en diferentes dosificaciones, buscando obtener las mezclas más idóneas en cuanto a fraguado, resistencia, consistencia y principalmente una cantidad de poros considerable.

### 3.6.2. Materiales para Preparación de los Morteros

#### 3.6.2.1. Aditivos para la fase 4

Llegada esta fase ya se habrían seleccionado dos de los cuatro aditivos aportadores de aire estudiados en la fase 3, para ser estudiados en la preparación de los morteros de esta fase combinados con el material soluble, estos son: *Master Air 100* y *Melmix I*, definidos en el Apartado 3.5.2.

Además, en tres de las mezclas, se ha utilizado un aditivo Acelerante de fraguado utilizado comúnmente en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC. Se trata de una disolución de sales de aluminio puramente inorgánicas con un 42% de materia sólida y contenidos de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) están alrededor de 12 %. El contenido en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de este producto le permite actuar como un eficaz acelerante de fraguado en mezclas fabricadas con cementos tanto del tipo I como del tipo II.

#### 3.6.2.2. Materiales para el Árido Soluble de la Fase 4

Los materiales objeto de estudio para esta fase, como candidatos a ser un árido soluble son cuatro: la urea, que fue seleccionada de acuerdo al comportamiento estudiado durante las Fases 1 y 2, estando ésta descrita en el anterior Apartado 3.3.2.4. Y tres áridos a base de polisacáridos preparados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC que se describen en el siguiente Apartado 3.6.2.3. A continuación, se muestra una Tabla 3.6 con los materiales estudiados en esta fase:

Naturaleza	Materiales para Árido Soluble
Árido parcialmente solubles a base almidón, arena y cemento.	1) Árido preparado en laboratorio a base de arena, cemento y almidón pregelatinizado Special Starch
Árido parcialmente solubles a base de polisacáridos derivados de goma guar.	2) Árido preparado en laboratorio a base de arena, cemento y polisacárido Esacol
	3) Árido preparado en laboratorio a base de arena, cemento y polisacárido Lamsize
Fertilizante nitrogenado	4) Urea industrial

Tabla 3. 6. Materiales para árido soluble objeto de estudio de la fase 4

#### 3.6.2.3. Áridos parcialmente solubles preparados a base polisacáridos, arena y cemento

Buscando nuevas formas de desarrollar el árido soluble, se ha planteado una técnica que permite desarrollar partículas con una granulometría adecuada para ser considerado como árido fino y la vez lo haría parcialmente soluble, empleando para la parte soluble tres tipos de polisacáridos en polvo que, al momento de humedecerlos, mediante el proceso de gelatinización, envolverían partículas de cemento y arena. Así, luego que este gel se disuelva en el medio alcalino, dejarían en la matriz cementicia la porosidad deseada.

Para contribuir con el proceso de disolución, se ha propuesto añadir los dos tipos aditivos inclusores de aire al agua de mezclado, buscando generar porosidades en la microestructura del árido

preparado. En la Figura 3.16 se muestra esquemáticamente el funcionamiento esperado de ese material:



Figura 3. 16. Esquema de funcionamiento del árido parcialmente soluble

**Composición de los áridos parcialmente solubles**

Debido a que para la formación de este árido es necesario formar una pasta, se ha hecho una dosificación por tanteo, hasta lograr el material deseado. Para la preparación de 250 gr de áridos para cada tipo de polisacárido en polvo, quedaron las muestras con la siguiente composición mostrada en la Tabla 3.7. El cemento, área y agua utilizados han sido los mismos con que se fabricaron los morteros, descritos en el apartado 3.4.2, y los tres tipos de polisacáridos en polvo se describen a continuación:

Árido parcialmente soluble con Master air			Árido parcialmente soluble con Melmix I		
Material	Peso (gramos)	Porcentaje	Material	Peso (gramos)	Porcentaje
Cemento	7,50	3%	Cemento	7,50	3%
Arena Caliza	180,00	72%	Arena Caliza	180,00	72%
Agua	27,50	11%	Agua	27,50	11%
Polisacárido en polvo	35,00	14%	Polisacárido en polvo	35,00	14%
Master Air 100	0,03	0,4%	Melmix I	0,028	0,3%

Tabla 3. 7. Composiciones y dosificaciones de los áridos parcialmente solubles a base de polisacáridos

**Almidón Pregelatinizado Special Starch**

Special Starch 6007 (Almidón Especial 6007), es un almidón modificado físicamente, consiste en un polvo blanco utilizado en la industria alimenticia para sopas, salsas, snacks, alimentos para bebés, niños y comida dietética. Es fabricado por la compañía Súdstärke, que es una empresa especializada en la producción del almidón de patata y de derivados de almidón (Anexo H).

**Polisacárido Esacol**

Esacol HS 30 R es un polisacárido natural diseñado para pinturas a base de agua suministrado por la empresa Lamberti Chemical Specialties. Es un producto derivado de goma guar, desde un punto de vista químico, el producto es un derivado de poli-galactomanano con una sustitución molar homogénea (MS) en la cadena polimérica. Esta propiedad mejora la bioestabilidad en el agua y en las pinturas a base de agua. Pero es un espesante con un comportamiento pseudoplástico, adecuado en aquellas aplicaciones que requieren un engrosamiento y la retención de agua (Anexo I).

**Polisacárido Lamsize**

El Lamsize 5300 es un polisacárido natural no iónico utilizado como un espesante con propiedades pseudoplásticas. También es un derivado de goma guar suministrado por la empresa Lamberti Chemical Specialties, tiene múltiples usos industriales (Anexo J).

En la Figura 3.17, se muestra el aspecto de los tres polisacáridos utilizados:



Figura 3. 17. Aspecto visual de los polisacáridos en polvo, a) Special Starch 6007, b) Esacol HS 30 R, c) Lamsize 5300.

#### Preparación de los áridos parcialmente solubles

La preparación de este árido se ha llevado a cabo siguiendo los pasos que se describen a continuación:

- Se ha mezclado arena, cemento y uno de los tres tipos de polisacáridos objeto de estudio con las dosificaciones especificadas en la Tabla 3.7.
- El amasado se ha hecho a mano, añadiendo el agua a la mezcla gradualmente hasta formar una pasta. La pasta formada se ha secado en una estufa a 110 grados Celsius por 24 horas.
- La pasta seca y endurecida se ha triturado mecánicamente hasta que las partículas pasaron por el tamiz de 4mm ASTM.
- Finalmente queda un árido formado por partículas de arena y cemento aglutinadas por el almidón, quedando las muestras para cada tipo de polisacárido con las formas mostradas en las Figuras 3.18.

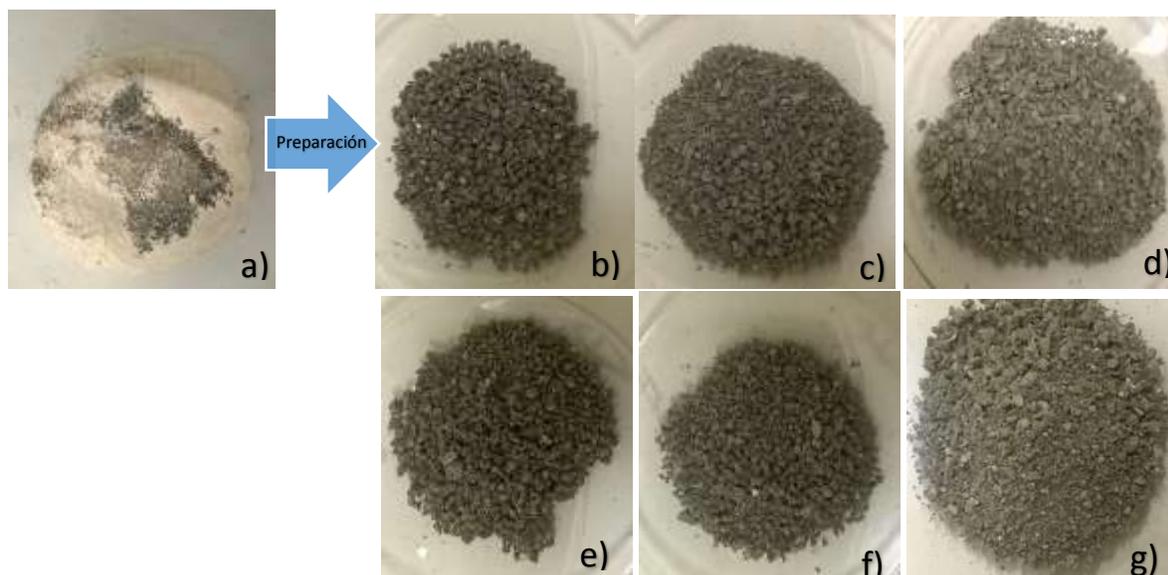


Figura 3. 18. Proceso de Preparación de áridos parcialmente solubles, a) mezcla de arena, cemento y un tipo de almidón, b) árido parcialmente soluble con Special Starch 6007 y Master Air(SMA), c) árido parcialmente soluble con Esacol HS 30 R y Master Air(EMA), d) árido parcialmente soluble con Lamsize 5300 y Master Air (LMA), e) árido parcialmente soluble con Special Starch 6007 y Melmix I (SM), f) árido parcialmente soluble con Esacol HS 30 R y Melmix (EM) g) árido parcialmente soluble con Lamsize 5300 y Melmix(LM).

### 3.6.3. Composición y Dosificación de los Morteros

Se han preparado morteros para cada tipo de materiales solubles estudiados en esta Fase 4, a manera de determinar la dosificación que presenta los mejores resultados. Así, se muestra la dosificación y composición de los morteros con la inclusión de los áridos preparados en el laboratorio en la Tabla 3.8, mientras que los preparados con la inclusión de la urea se muestran en la Tabla 3.9.

<b>Morteros con Áridos Preparados a Base de Almidón y Aditivos Inclusores de Aire</b>					
<b>Mortero SMA</b>		<b>Mortero SM</b>		<b>Mortero EMA</b>	
Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)
Cemento	310	Cemento	310	Cemento	310
Arena	945	Arena	945	Arena	945
Agua	214	Agua	214	Agua	214
Special Starch con Master Air 100	170	Special Starch con Melmix I	170	Esacol con Master Air	170
<b>Mortero EM</b>		<b>Mortero LMA</b>		<b>Mortero LM</b>	
Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)
Cemento	310	Cemento	310	Cemento	310
Arena	945	Arena	945	Arena	945
Agua	214	Agua	214	Agua	214
Esacol con Melmix I	170	Lamsize con Master Air 100	170	Lamsize con Melmix I	170

Tabla 3. 8. Composición de los morteros con áridos preparados a base de almidón y aditivos inclusores de aire

<b>Mortero con Urea + Aditivos Inclusores de Aire</b>					
<b>Mortero UA1</b>		<b>Mortero UA2</b>		<b>Mortero UA3</b>	
Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)
Cemento	450	Cemento	450	Cemento	450
Arena	1250	Arena	1250	Arena	1250
Agua	225	Agua	225	Agua	155
Urea	100	Urea	100	Urea	100
Master Air 100 (0,4% sobre peso de cemento)	1,8	Melmix I (0,3% sobre peso de cemento)	1,35	Melmix I (0,3% sobre peso de cemento)	1,35
<b>Mortero UA4</b>		<b>Mortero UA5</b>		<b>Mortero UA6</b>	
Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)	Materiales	Peso (gramos)
Cemento	450	Cemento	450	Cemento	450
Arena	1250	Arena	1150	Arena	1050
Agua	225	Agua	225	Agua	182
Urea	100	Urea	200	Urea	300
Melmix I (0,4% sobre peso de cemento)	1,8	Melmix I (0,4% sobre peso de cemento)	1,8	Melmix I (0,4% sobre peso de cemento)	1,8
Acelerante de Fraguado	24	Acelerante de Fraguado	30	Acelerante de Fraguado	50

Tabla 3. 9. Composición de los morteros con urea y aditivos inclusores de aire (morteros UA)

### 3.6.4. Preparación de los Morteros

Se han empleado el mismo procedimiento de mezcla de los morteros anteriores, que consiste en la pre-mezcla en seco de los componentes sólidos (cemento, arena y material soluble) utilizando la amasadora durante unos 30 segundos, para homogenizar la mezcla, tras lo cual se ha procedido al amasado incorporando el agua, amasando 1 minuto. Se dejó reposar por 30 segundos y luego amasando durante 1 minuto más.

### 3.6.5. Proceso de Fabricación y Curado de las Probetas

Para cada composición de las mostradas en las Tablas 3.8 y 3.9, se han fabricado probetas de 40 mm X 40 mm X 160 mm. Las probetas se han enmoldado siguiendo el mismo proceso que en las fases anteriores. Las probetas fueron desmoldadas en intervalos de 24 a 48 horas tras la fabricación, en base al aspecto visual, resistencia y consistencia de las muestras. Tras el desmolde, el proceso de curado se ha realizado dejando las probetas en un cámara húmeda del laboratorio de la UPC, hasta endurecer.

### 3.6.6. Observaciones y Ensayos de Materiales Idóneos

#### Disolución controlada y efectos secundarios en la matriz del mortero por parte de los áridos

Nuevamente, este es el factor más importante a observar, es fundamental que los árido preparados, y las nuevas dosificaciones de urea, se disuelva en la matriz de las mezclas cementicias.

#### Consistencia de la mezcla

Interesa que los morteros presenten una consistencia que le permita tener características autocompactante, antes que seca. Así se ha evaluado la consistencia de los morteros, comparando sus valores con el mortero normalizado de referencia descrito en la Tabla 3.4. La consistencia de los morteros se ha determinado por medio de la mesa de sacudidas, según la Norma UNE-EN 1015-3. Se ha seguido el procedimiento que se describe a continuación.

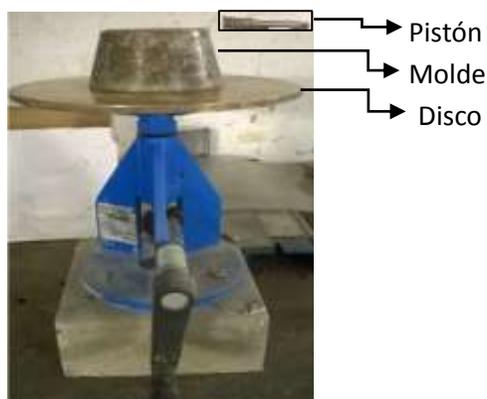


Figura 3.19. Mesa de sacudidas para ensayo de consistencia de los morteros

Se han hecho dos determinaciones por mezcla utilizando la mesa de sacudidas descrita en la Figura 3.19. Para determinar el valor del escurrimiento, se ha colocado el molde, y en su caso con la tolva, en el centro del disco de la mesa de sacudidas, apoyado por su base mayor, se llena con el mortero en dos capas, cada una de las cuales se compacta con 10 golpes del pistón para asegurar un llenado

uniforme del molde. Se ha eliminado el exceso de mortero enrasando la superficie con una regla metálica. Luego de 30 segundos, se ha separado el molde en forma vertical y lentamente. Se ha dejado caer el disco 20 veces por cada prueba realizada con una frecuencia constante de sacudida por segundo.

Se ha medido en milímetros el diámetro del mortero extendido sobre el disco de la mesa de sacudidas en dos direcciones perpendiculares entre sí, para determinar el escurrimiento. Éste se calcula determinando la media aritmética de los escurrimientos parciales obtenidos con cada una de las dos determinaciones realizadas. Los morteros en estado fresco se han clasificado en función de la consistencia (escurrimiento) como se indica en la Tabla 3.10, en la que, a efectos de la norma, se ha incluido en la columna tercera la designación abreviada.

<b>Mortero Fresco</b>	<b>Consistencia, Ecurrimiento, Mm</b>	<b>Designación</b>
<b>Seco</b>	<140	S
<b>Plástico</b>	140 a 200	P
<b>Fluido</b>	>200	F

Tabla 3. 10. Designación de consistencias de los morteros

#### Tiempo de fraguado

En esta fase, también se ha evaluado los efectos de las nuevas composiciones de los morteros, en el fraguado de las mezclas preparadas.

#### Determinación de la Densidad seca y aparente, y Porosidad accesible al agua de los Morteros

Se han determinado la densidad seca y la densidad aparente de las probetas y el porcentaje de porosidad accesible al agua para los morteros los morteros con urea, siguiendo la misma metodología descrita en el apartado 3.5.5.2.

#### Resistencia mecánica obtenida

Se han determinado las resistencias mecánicas a flexión y a compresión de las probetas con urea, siguiendo el mismo procedimiento descrito en el Apartado 3.5.5.3, para edades de ensayo de 7 días.

## CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Quedando descrita la metodología seguida para los diferentes ensayos y evaluaciones realizados durante esta investigación, este capítulo tiene como objetivo, presentar y analizar los resultados obtenidos durante la campaña experimental, presentándolos acorde a las fases en que se ha desarrollado la investigación. Así, inicialmente se muestran los resultados de los ensayos de la Fase 1, sobre la disolución de los materiales que se han propuesto como objetos de estudio para árido soluble. Y así concluir los materiales que presentaron un mejor comportamiento en cuanto a la cinética de disolución.

Luego se detallan los resultados de incluir dichos materiales en las mezclas de morteros preparadas durante la Fase 2, en cuanto al tiempo fraguado de los morteros y la disolución del material en la matriz del mortero. Y una vez expuestos los resultados se presenta las conclusiones parciales a partir de las cuales se ha determinado los materiales que se consideraron como los más idóneos para continuar la investigación. Seguidamente, se muestran y analizan los resultados de incluir en los morteros con los cuatro tipos de aditivos inclusores de aire en mezclas preparadas en la Fase 3, y los resultados de haber evaluado su influencia sobre densidades, porosidad accesible al agua y resistencia mecánica de los morteros.

Finalmente, se presentan los resultados de la Fase 4 sobre los materiales, tanto áridos como aditivos que se habían considerados como materiales idóneos, que fueron combinados en nuevas mezclas simultáneamente. Fase en la que se han evaluado la disolución del árido y el tiempo de fraguado, densidades, porosidad accesible al agua y resistencia mecánica de los morteros.

## 4.2. RESULTADOS DE LA FASE 1: EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE DISOLUCIÓN

### 4.2.1. Disolución de la Zeolita

En la Figura 4.1.a se aprecia la muestra de zeolita sumergida en la solución alcalina. En esta figura se observa notoriamente una división entre las partículas más gruesas que se quedan debajo de las partículas más finas. Se aprecia en la Figura 4.1.b una curva de disolución de la muestra de zeolita. Donde se relaciona el porcentaje de masa de la muestra solubilizada en la solución alcalina por el tiempo. También se puede apreciar que el material no presentó solubilización considerable en las 5 semanas de exposición a la solución alcalina.

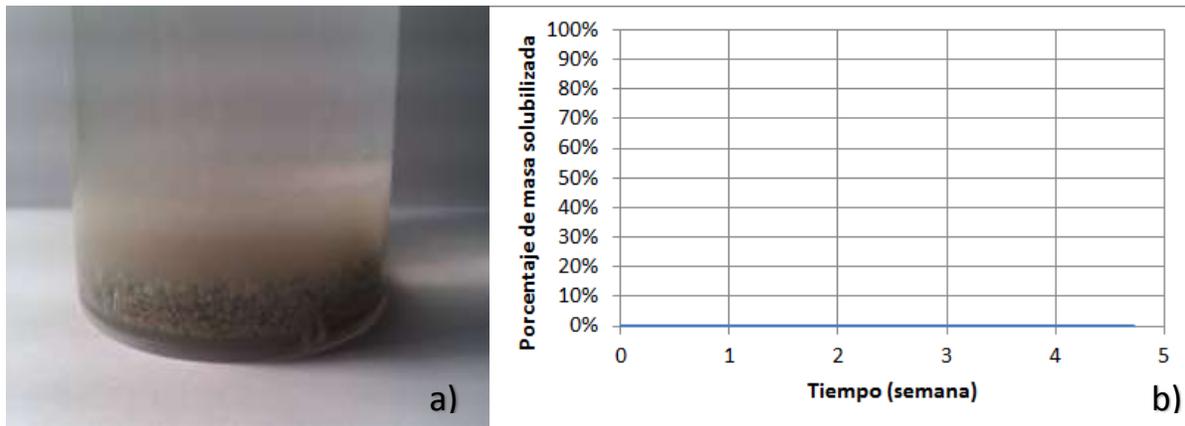


Figura 4. 1. Cinética de disolución de la zeolita, a) muestra expuesta a la solución alcalina, b) curva de disolución

### 4.2.2. Disolución de la Sepiolita

La Figura 4.2.a presenta una foto de la solución alcalina con la muestra de sepiolita sumergida. Al igual que sucedía con la muestra de zeolita, en la muestra de sepiolita también se aprecia una evidente separación entre las partículas más gruesas y las más finas. Se puede apreciar en la Figura 4.3.b la curva de solubilización de la zeolita. Siendo representada por el porcentaje de masa solubilizada en la solución alcalina frente al tiempo de exposición. También se observa que la disolución fue inexpresiva en las primeras semanas, teniendo una pérdida de masa de cerca de 2 %.

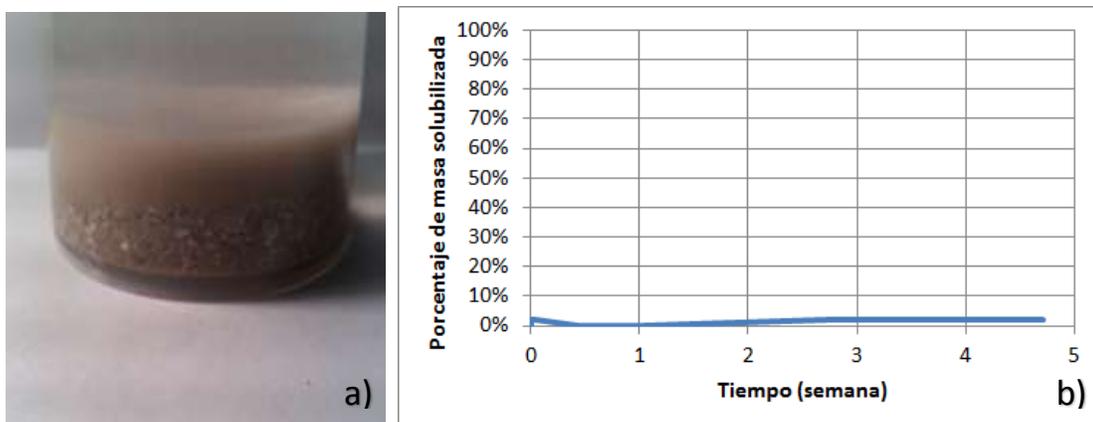


Figura 4. 2. Cinética de disolución de la Sepiolita, a) muestra expuesta a la solución alcalina, b) curva de disolución

#### 4.2.3. Disolución del Polímero Termoplástico

Las muestras del polímero termoplástico mostraron una respuesta interesante al someterlas al proceso de solubilización en el medio alcalino, solubilizándose a una velocidad razonable. La Figura 4.3.b presenta la curva de disolución del polímero termoplástico frente a la solución alcalina. Donde se confronta el porcentaje de masa solubilizada con el tiempo de exposición en un medio alcalino. Al final de la primera semana se aprecia una pérdida de masa de cerca de un 30%. Sin embargo, durante el proceso de solubilización se forma un gel en la superficie de las partículas del polímero, el cual aumenta el volumen de las muestras y dificulta el avance del proceso de solubilización, como se puede ver en la Figura 4.3.a.

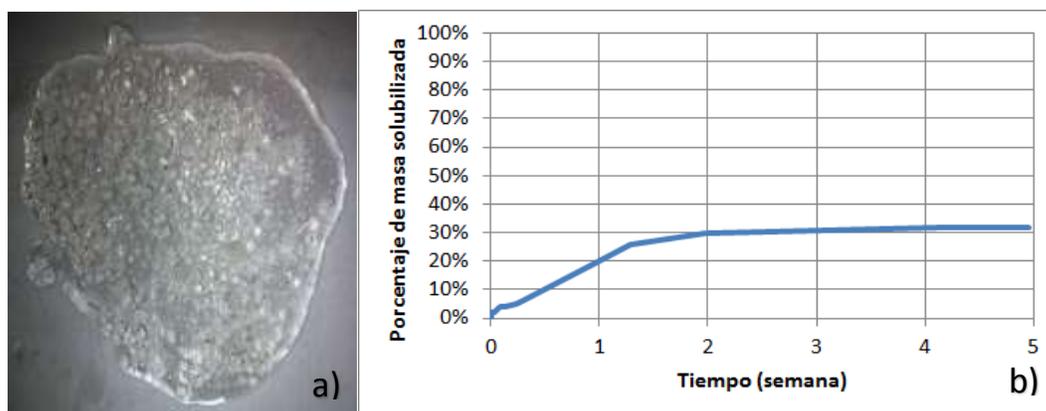


Figura 4. 3. Cinética de disolución del Polímero termoplástico, a) muestra expuesta a la solución alcalina, b) curva de disolución

#### 4.2.4. Disolución de la Urea

En cuanto a la urea, luego que fue sometida a la acción de la solución alcalina, todo el material se había disuelto al cabo de 30 minutos. Como se puede observar en la Figura 4.4.b, se disuelve de forma muy rápida, de tal manera que en los primeros 5 minutos ya se había disuelto más del 80% del material, luego el proceso de disolución del material disminuye la velocidad, pero igual termina de disolverse brevemente sin ningún tipo de estimulación mecánica. Cabe resaltar que la agitación de la mezcla, hace que la cantidad de urea en muestra, se disuelva al cabo de 5 minutos como máximo.

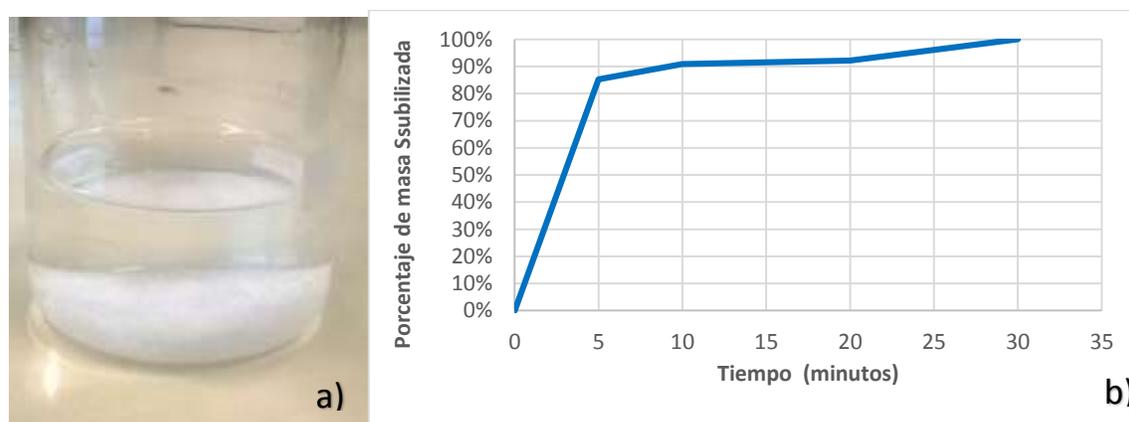


Figura 4. 4. Curva de disolución de la urea

#### 4.2.5. Disolución de la Celulosa

En la Figura 4.5 se aprecia la curva de disolución de la celulosa. Como se observa, la disolución de la muestra ensayada comienza al final de la primera semana de exposición a la solución alcalina, presentando cerca de un 15% de solubilización al final de la cuarta semana. ,

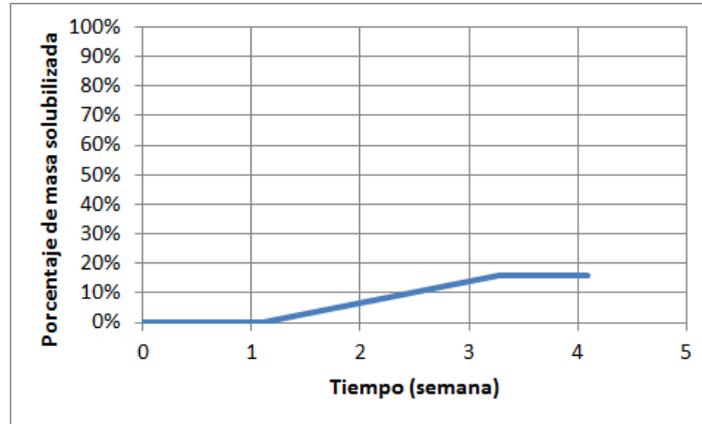


Figura 4.5. Curva de disolución de la celulosa

#### 4.2.6. Disolución del Almidón Modificado

Los estudios de disolución revelaron una buena respuesta, para este material. En la Figura 4.6 se presenta la curva de masa solubilizada a lo largo del tiempo, se puede apreciar que el proceso tarda a empezar y después llega a una estagnación debido a la saturación de la solución. El almidón se había disuelto en un 40% al cabo de dos días.

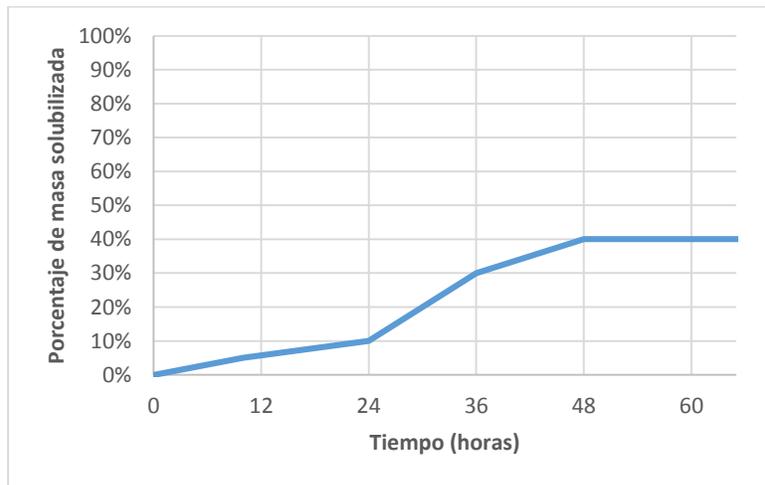


Figura 4.6. Cinética de disolución del almidón modificado

#### 4.2.7. Conclusiones Parciales Sobre la Fase 1

Según lo planteado anteriormente, de los seis tipos de muestras estudiados en la fase 1, sólo dos no presentaron un porcentaje de pérdida de masa apreciable durante el tiempo de exposición en

la solución alcalina, estas fueron las dos muestras de arcilla: Zeolita y Sepiolita. Por lo que desde ya se esperaba que no tuvieran un buen comportamiento en cuanto a solubilidad en la matriz cementicia de los morteros.

El polímero termoplástico y la celulosa, han tomado varias semanas para presentar una pérdida de masa entre 30 y 40%, respectivamente. Mientras, el almidón se ha disuelto hasta el 40% en un periodo de exposición de dos días. La urea es la muestra que se ha disuelto de la forma más fácil y rápida, al cabo de media hora ya se había disuelto todo el material expuesto a la solución alcalina.

Así, el almidón presenta una cinética de disolución más adecuada, en cuanto a que al momento de su aplicación en morteros u hormigones, empezaría a disolverse al cabo de un tiempo prudente tras la puesta en obra. Por otro lado, la urea presenta una buena opción, en cuanto a que es capaz de disolverse totalmente al cabo de media hora. Sin embargo, esto representa una problemática al pensar el material como árido para mezclas cementicias, ya que podría perderse todo el árido durante el proceso de amasado, no llegando a disolverse durante el proceso de hidratación del cemento, que es lo que interesa para poder obtener la porosidad deseada.

### 4.3. RESULTADOS DE LA FASE 2: INTERACCIÓN ÁRIDO SOLUBLE-PASTA DE MORTEROS

#### 4.3.1. Interacción de los Morteros con la Zeolita

En el caso de la zeolita no hubo retraso en el fraguado, las probetas podían ser perfectamente desmoldadas antes de las 24 horas. Por otra parte, en la Figura 4.7 se muestra una foto del mortero fabricado con zeolita, a los 10 días desde la fabricación. Como era esperable de acuerdo a los resultados obtenidos en la Fase 1, en un análisis visual no se apreció solubilización superficial de la zeolita en las muestras de mortero. Así, las características presentadas en cuanto a solubilidad para este material al igual que en la Fase 1, no fueron satisfactorias.



*Figura 4. 7. Probeta de mortero con Zeolita. Edad de 10 días*

#### 4.3.2. Interacción de los Morteros con la Sepiolita

En el caso de la sepiolita no hubo retraso en el fraguado, las probetas podían ser desmoldadas antes de las 24 horas. Se observa en la Figura 4.8 una foto del mortero de sepiolita. En un análisis visual de la superficie del mortero, no se apreció solubilización aparente de los áridos. Si bien, aparecieron unas manchas oscuras en zonas superficiales de la probeta, pero no hay vacíos. Así, las

características presentadas hasta el momento tampoco fueron satisfactorias, como era de esperarse, según los resultados de la cinética de disolución evaluados en la fase anterior.



Figura 4. 8. Probeta de mortero con Sepiolita. Edad de 10 días

#### 4.3.3. Interacción de los Morteros con el Polímero Termoplástico

A continuación, se aprecia el mortero fabricado con el polímero termoplástico el cual ha fraguado entre un periodo de 24 a 48 horas. Con un análisis visual del aspecto superficial, se apreció formación de huecos por solubilización externa del material a los 2 días, como se muestra en la Figura 4.9.a. Pero también, comenzaron a aparecer fisuras de forma mapeada por la aparición del gel anteriormente mostrado en la Figura 4.4.a. Las grietas formadas inicialmente fueron aumentando la abertura con el pasar de los días, como se aprecia en la figura 4.9.b, que es el mortero a los 11 días. Así, se puede considerar que las muestras de mortero fabricadas con el polímero termoplástico no mostraron un comportamiento satisfactorio.



Figura 4. 9. Probeta de mortero con el polímero termoplástico, a) Edad de 2 días, b) Edad de 11 días

#### 4.3.4. Interacción de los Morteros con la Urea

En el caso del mortero con la incorporación de la urea, se encontró que las probetas fueron incapaces de fraguar antes de los 5 días luego de su preparación. En la figura 4.10 se observa el aspecto de las probetas a la edad de 2 días. Esto sucede a causa de reacciones endotérmicas propias

del calor de disolución de la urea, ya que se pudo percibir sudoración en el envase de mezclado durante el amasado de este mortero, debido a las bajas temperaturas que produjo la urea durante el mezclado; esta condición inicial puede bajar la temperatura y retrasar las reacciones de hidratación del cemento. También se observa que la urea no se había disuelto completamente.



Figura 4. 10. Probeta de mortero con urea. Edad de 2 días.

Una vez habían terminado el fraguado, se apreció una formación de huecos por solubilización de la urea en la superficie de las probetas, como se muestra en las Figura 4.11.a y Figura 4.11.b, respectivamente). La mayor parte de los huecos formados exteriormente son de pequeño tamaño, esto debido a la rápida disolución de la urea, donde los gránulos empezarían a disolverse antes del endurecimiento del mortero.



Figura 4. 11. Probeta de mortero con urea a edad de 5 días, a) superficie de la probeta, b) interior de la probeta

En los días posteriores, se presentaron eflorescencias constantes de sales, que una vez se secan, cristalizan. En la Figura 4.12 se muestra el interior de las probetas y las eflorescencias de sales ya cristalizadas. Se puede observar que los gránulos de urea han logrado disolverse completamente, así en la parte próximas a las paredes exteriores de las probetas, se observan las oquedades dejadas por el material y sales resultante se ha precipitado hacia el exterior. Mientras, en el centro de las probetas, donde las sales no ha logrado salir, se encuentran ocupando los huecos.

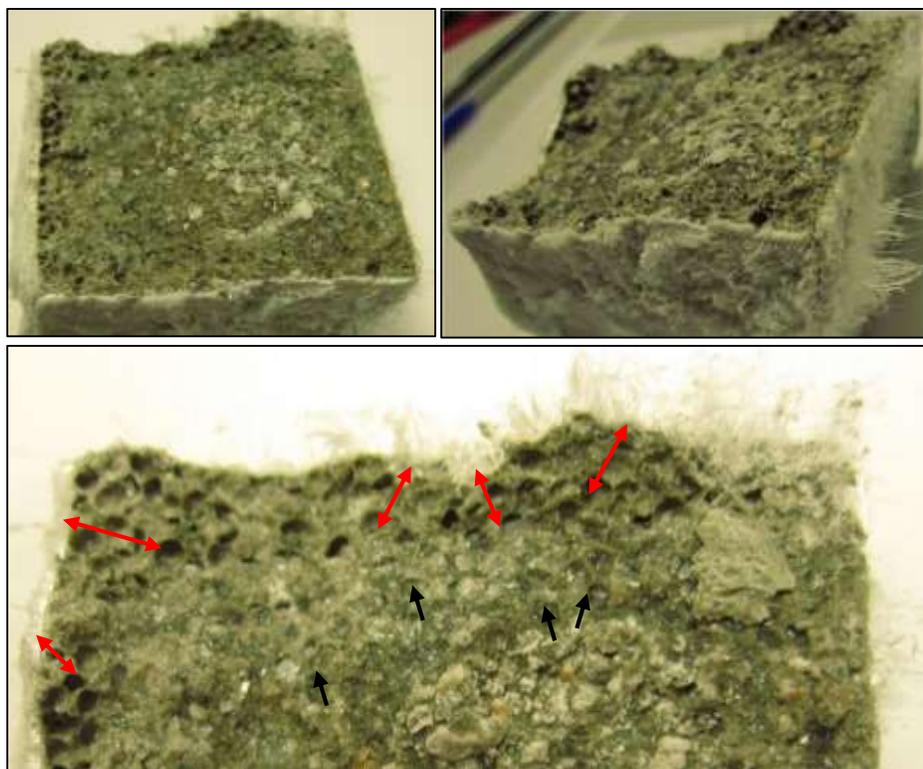


Figura 4.12. Estructura del mortero con urea con sales cristalizadas a edad de 16 días a) superficie de la probeta, b) interior de la probeta

#### 4.3.5. Interacción de los Morteros con la Celulosa

Debido a la elevada absorción de agua presente en las características de la celulosa, la mezcla quedó más seca que las demás para la misma dosificación. La Figura 4.13 presenta el mortero de celulosa. Se aprecia aspecto visual del mortero distinto de los demás, debido que la celulosa tenía un formato de casi polvo (Figura 3.6). Si se quisiera continuar la investigación con la celulosa, el proceso de fabricación debe ser cambiado para resultar en granos de mayor tamaño y mayor porosidad.



Figura 4.13. Probeta de mortero con celulosa. Edad de 16 días

#### 4.3.6. Interacción de los Morteros con el Almidón Modificado

En el caso del mortero con almidón modificado ha fraguado en un periodo de 48 horas. En la Figura 4.14 se aprecia el aspecto del mortero a los 2 días. En un análisis visual de la superficie del mortero en los primeros días, ya se constataba que los áridos más superficiales estaban blandos. Al final de

4 días ya se podía retirar los áridos superficiales sin esfuerzo. Sin embargo, como los áridos no tenían una granulometría baja y tampoco continua, no estaban conectados. Esa falta de conectividad dificulta la degradación de los áridos que están en la parte más interna de la probeta. Así se entendió, que aumentando la porosidad del material y ajustando su tamaño el proceso de degradación podrían mejorarse las propiedades de este material como árido soluble, para que pueda formar interconectados.



Figura 4. 14. Probeta de mortero con almidón modificado. Edad de 2 días

#### 4.3.7. Conclusiones Parciales Sobre la Fase 2

Según los resultados de esta segunda fase, la arcillas han quedado descartadas como posibles áridos solubles, debido a que, si bien no afectan el proceso de fraguado, no se disuelven en la matriz de los morteros. Este resultado era de esperarse, debido al mal comportamiento que mostraron ambos materiales en cuanto a la cinética de disolución evaluada en la anterior Fase 1.

En el caso del polímero termoplástico tampoco se ha de considerar como una buena opción, ya que a pesar de que se ha disuelto en el mortero, genera un gel expansivo que fisura el mortero, sustancia que puede ser vista claramente en la Figura 4.3.a.

En cuanto a la urea, resultó ser el material que más retardó el tiempo de fraguado de los morteros, debido a reacciones endotérmicas generadas durante el proceso de disolución. En esta fase, para la dosificación empleada, la urea no se ha disuelto con la rapidez esperada. Según los resultados obtenidos durante la evaluación de la cinética de disolución, hasta este momento se temía perder gran parte del material durante el proceso de amasado de los morteros. Una vez la urea ha logrado disolverse completamente en la matriz de los morteros, ha generado una red de poros interconectados con características muy deseables para el objetivo buscado en esta investigación. Sin embargo en el interior de las probetas la red de poros es ocupada por sales cristalizadas que no han, cuando estas no han logrado aflorar al exterior.

En lo que se refiere a los polisacáridos, en los morteros con celulosa se ha apreciado una demanda de agua considerablemente mayor a la de los demás morteros, generando mezclas con consistencias muy secas y difícilmente trabajables. Por su parte el almidón no ha logrado disolverse completamente en la matriz de los morteros, sin embargo los gránulos de almidón se mostraban muy blandos al momento de tratar de retirarlos de la superficie de la probeta, lo que da una idea de que no se alcanzó un mayor grado de disolución debido al gran tamaño y falta de porosidad del árido de almidón. El fraguado lento en estos casos es razonable, dado es bien sabido que la glucosa presente en estos compuestos retrasa el fraguado.

Visto lo anterior, se ha determinado que la urea y el almidón modificado son los que han presentado los resultados más favorables en esta fase, considerando que pueden funcionar si se corrigen los problemas presentados. Por un lado, la formación excesiva de sales por parte de la urea, y por el otro, ajustando la granulometría y estructura del árido de almidón, conjuntamente con el inconveniente de retraso de fraguado que presentan ambos casos.

#### 4.4. RESULTADOS DE LA FASE 3: INTERACCIÓN ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE-PASTA DE MORTEROS

##### 4.4.1. Distribución y Tipo de Burbuja Generada

Los morteros aditivados resultaron presentar diferencias notables en cuanto a la cantidad y tamaño de poros generados por los aditivos inclusores de aire, como se muestra en las siguientes imágenes:

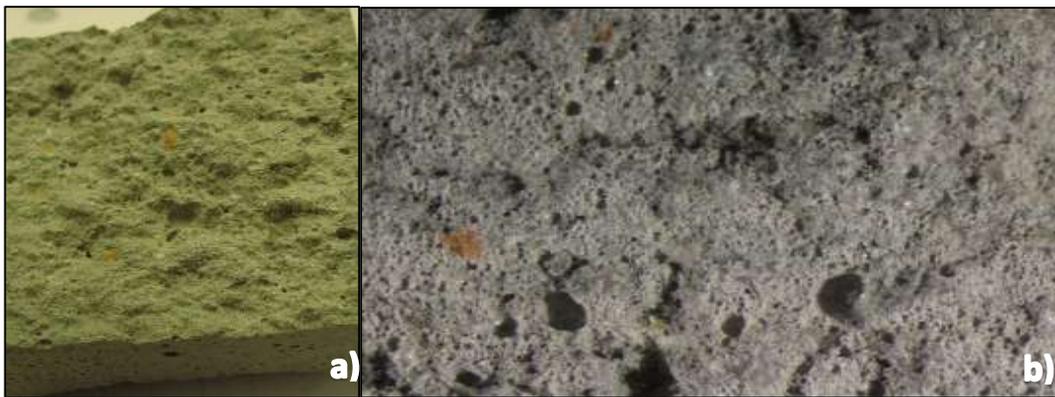


Figura 4.15. Estructura del mortero aditivado con Master Air 100, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica.



Figura 4.16. Estructura del mortero aditivado con Melmix, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica.

En la Figura 4.15.b se puede ver la estructura interna del mortero aditivado con el inclusor de aire Master air 100, se observa que presenta una gran cantidad de burbujas, de tamaño muy pequeño. Este aditivo resultó ser el que tiende a introducir la mayor cantidad de burbuja y en menor tamaño,

en comparación con los demás aditivos estudiados. Por su parte el Melmix I presenta tamaños de burbujas mayores, pero en menor cantidad respecto al master air 100, como se puede ver en la Figura 4.16.c. En este, la estructura porosa es más discontinua.

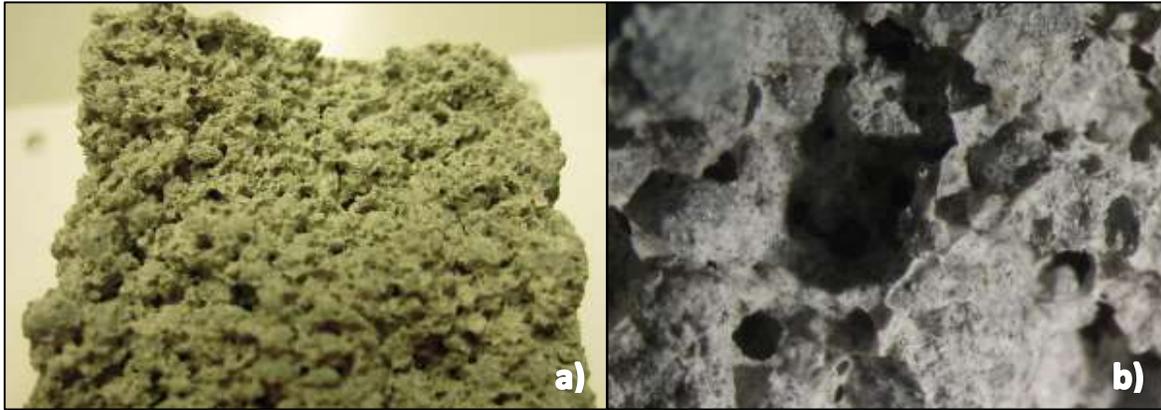


Figura 4.17. Estructura del mortero aditivado con MasterCell 10, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica.

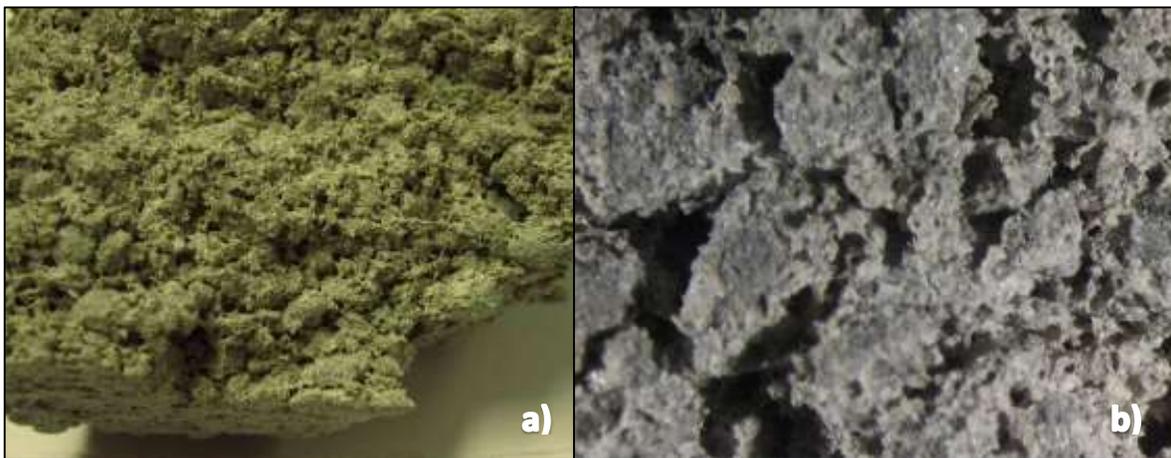


Figura 4.18. Estructura del mortero aditivado con Glucocon 215, a) aspecto de la probeta, b) vista microscópica.

En el caso de los morteros con los dos aditivos restantes, en la estructura interna del mortero aditivado con Glucocon 215, se pueden apreciar burbujas de gran tamaño y en poca cantidad como se aprecia en la Figura 4.18.b. De los dos aditivos de burbuja de gran tamaño el que genero mayor porosidad fue el MasterCell 10, incluso pueden ser observadas perfectamente sin necesidad de una vista microscópica (Figura 4.17.a), este aditivo ha dado un aspecto espumeante al mortero, aumentando considerablemente la porosidad, generando huecos de mayor tamaño los demás aditivos, como puede apreciarse en la Figura 4.17.b.

#### 4.4.2. Densidades, Porosidad Accesible al Agua y Resistencias

En las siguiente Tabla 4.1 se resumen los resultados de cada mortero aditivado. En el caso de la resistencia mecánica, las 3 probetas con edades de ensayo de 2, 7 y 28 días. Para el caso del aditivo

MasterCell 10 se consideraron resistencias nulas, lográndose romper las probetas con las manos fácilmente.

Mortero	Dosis sobre peso de cemento	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad accesible al agua (%)	Edad (días)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)
Normalizado	---	2,36	2,01	14,96	2	6,30	26,50
					7	7,20	33,80
					28	5,80	<b>34,30</b>
Con Master Air 100	0,4%	1,99	1,69	15,30	2	6,00	10,50
					7	3,30	28,20
					28	7,90	<b>33,50</b>
Con Melmix I	0,4%	1,89	1,39	25,00	2	1,50	10,80
					7	2,90	11,10
					28	2,90	<b>12,00</b>
Con MasterCell 10	0,4%	2,01	1,23	39,06	2	Resistencia Nula	Resistencia Nula
					7		
					28		
Con Glucocon 215	0,4%	2,20	1,31	40,47	2	2,40	6,70
					7	1,90	8,10
					28	3,20	<b>9,00</b>

Tabla 4. 1. Densidades, porosidad accesible al agua y resistencias de las probetas con aditivos inclusores de air

#### 4.4.3. Conclusiones Parciales Sobre la Fase 3

A partir de las evaluaciones realizadas en esta fase, se ha observado que la porosidad generada por la incorporación de los aditivos empleados ha influido directamente en la resistencias de los morteros, resultando menos resistentes, en tanto mayor tamaño de poros ha presentado la estructura del mortero, como en los casos de los aditivos que generan burbujas de tamaño grande como el MasterCell 10 y el Glucocon 215. Se ha considerado que deprimen excesivamente la resistencia de las mezclas, por lo que no sería muy adecuado utilizarlos en mezclas que pueden tener más poros todavía, comprometiendo aún más las propiedades mecánicas.

Por otra parte, el mortero con menor tamaño de poro es el Master Air 100, es el que mayor cantidad de burbujas genera, y presenta la resistencia mecánica más elevada, restando solo un 2.33% de la resistencia a compresión a 28 días, respecto al mortero de control. Esta es una propiedad que interesa, ya que se gana porosidad sin comprometer demasiado la resistencia de los morteros. En lo que respecta al Melmix I, se ha considerado como un aditivo de tamaño de burbuja mediana, este genera más porosidad que el anterior y, pero de la misma manera disminuye la resistencia del material. Así, de acuerdo a los resultados obtenidos, se habrían escogido los aditivos Master air 100 y Melmix I para combinarse con los materiales solubles estudiados en la Fase 4, considerando que los morteros aditivados han presentado un balance entre porosidad y resistencia. En donde el aditivo Melmix I se aplicaría en menor porcentaje, debido a los efectos sobre la resistencia de la mezcla.

#### 4.5. RESULTADOS DE LA FASE 4: COMBINACIÓN ÁRIDO SOLUBLE-ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE EN MORTEROS

##### 4.5.1. Disolución Controlada y Efectos Secundarios en la Matriz de los Mortero

###### Morteros con áridos preparados en laboratorio a base de polisacáridos

Debido a la dificultad presentada por el almidón modificado estudiado durante la Fase 2, de no disolverse en la matriz del mortero, a pesar de haber mostrado una cinética de disolución aceptable en la Fase 1, surgió la idea de reducir la granulometría y agregar porosidad al material, para facilitar su disolución y la consecuente generación de huecos. Así se prepararon los áridos a base de polisacáridos naturales como se ha descrito en el Apartado 3.6.2.3, donde se optó por seleccionar otros polisacáridos, tratando de superar la otra problemática que presenta el almidón modificado de retardar el fraguado por el mayor contenido de glucosa.

A continuación se muestran los aspectos de las probetas de los morteros con árido preparado con las dosificaciones, y combinaciones de polisacáridos y aditivos, detalladas en la Tabla 3.8. Se observa en los morteros SM (Figura 4.19.a), EMA (Figura 4.20.a) y EM (Figura 4.21.a), que las superficies de las probetas se agrietaron durante el proceso de fraguado. Tampoco mostraron una cantidad significativa de poros apreciables a la vista (Figura 4.19.b, Figura 4.20.b y Figura 4.21.b) y el aspecto de las probetas denotan morteros con una estructura gruesa y agrietada a la edad de 2 días, antes que porosa, y formas muy irregulares, mostrando ser mezclas poco trabajables. Además, luego de estar 5 días en la cámara húmeda del laboratorio, se observaron segregaciones productos de la gelatinización de los diferentes polisacáridos empleados como se muestra en la Figura 4.19.c, Figura 4.20.c y Figura 4.21.c. señaladas con flechas color naranja.

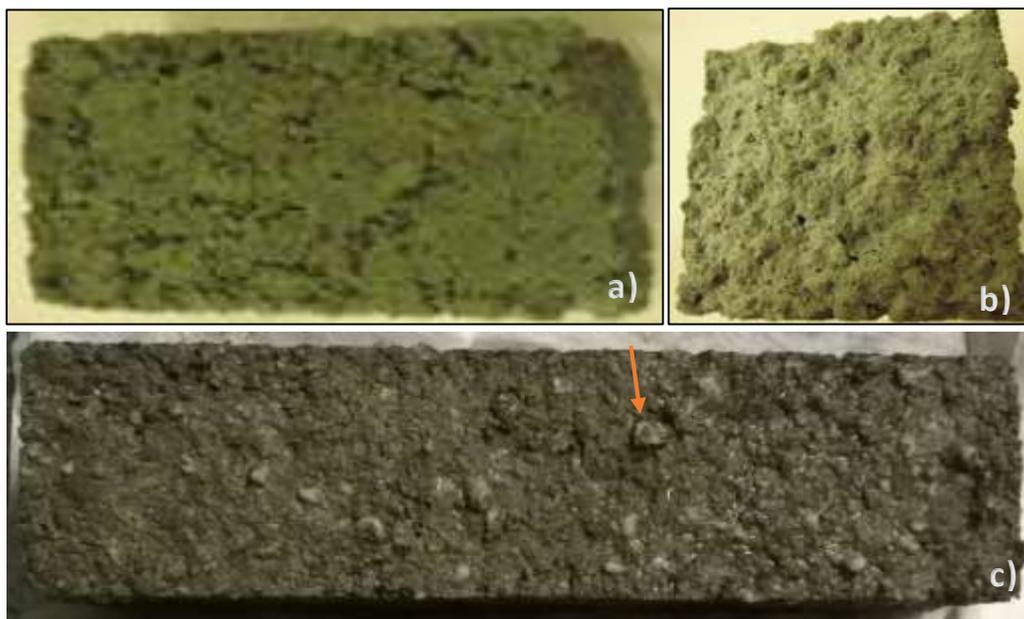


Figura 4. 19. Aspecto de Mortero con Special Starch 6007 y Melmix I (SM), a) superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda.

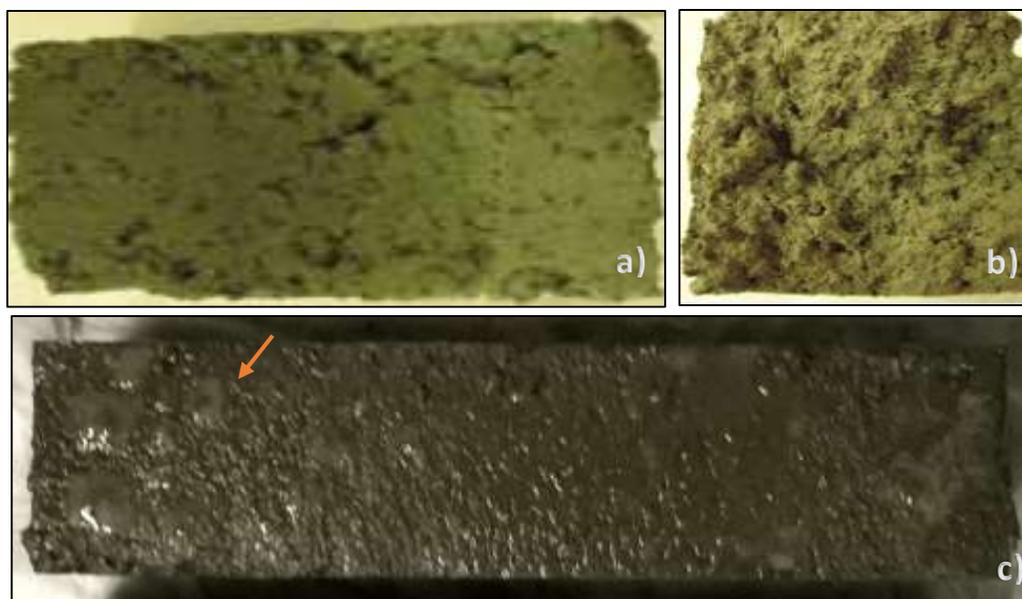


Figura 4. 20. Aspecto de mortero con Esacol HS 30 R y Master Air (EMA), a) superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda.

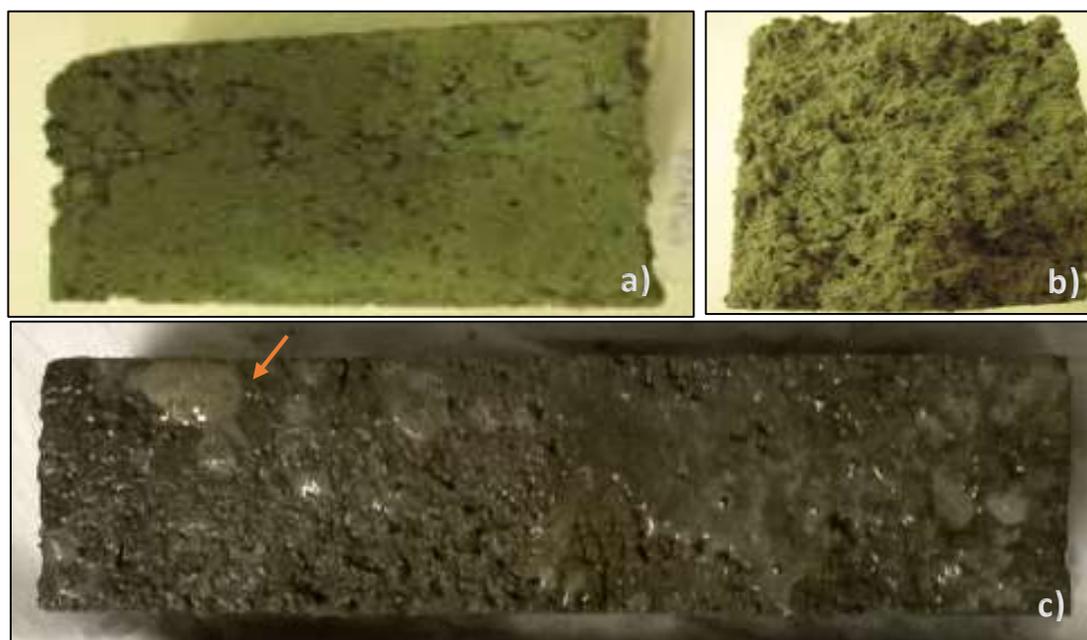


Figura 4. 21. Aspecto de mortero con Esacol HS 30 R y Melmix (EM). a) Superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda.

En los morteros SMA (Figura 4.22.a y b), LMA (Figura 4.23 a y b) y EM (Figura 4.24 a y b), se apreció un aspecto menos grueso, y no aparecieron grietas en las superficies de las probetas. Se pueden observar más poros internos que en los casos anteriores, que parecen ser producto de los aditivos aireantes, y no por los vacíos dejado por la disolución parcial de los áridos preparados a base los de polisacárido empleado. Pero al igual que los morteros anteriores, luego de estar 5 días en la cámara húmeda del laboratorio, se observaron segregaciones productos de la gelatinización de los

diferentes polisacáridos salir por los poros se muestran en las Figura 4.22.c, Figura 4.23.c y Figura 4.24.c.

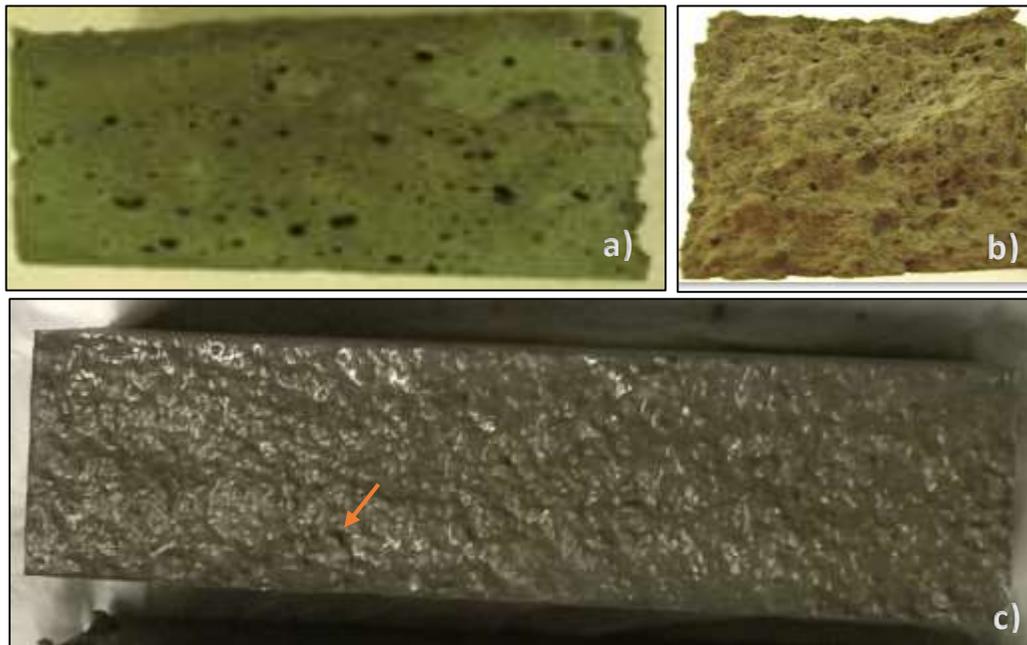


Figura 4. 22. Aspecto de mortero con Special Starch 6007 y Master Air (SMA), a) superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda.

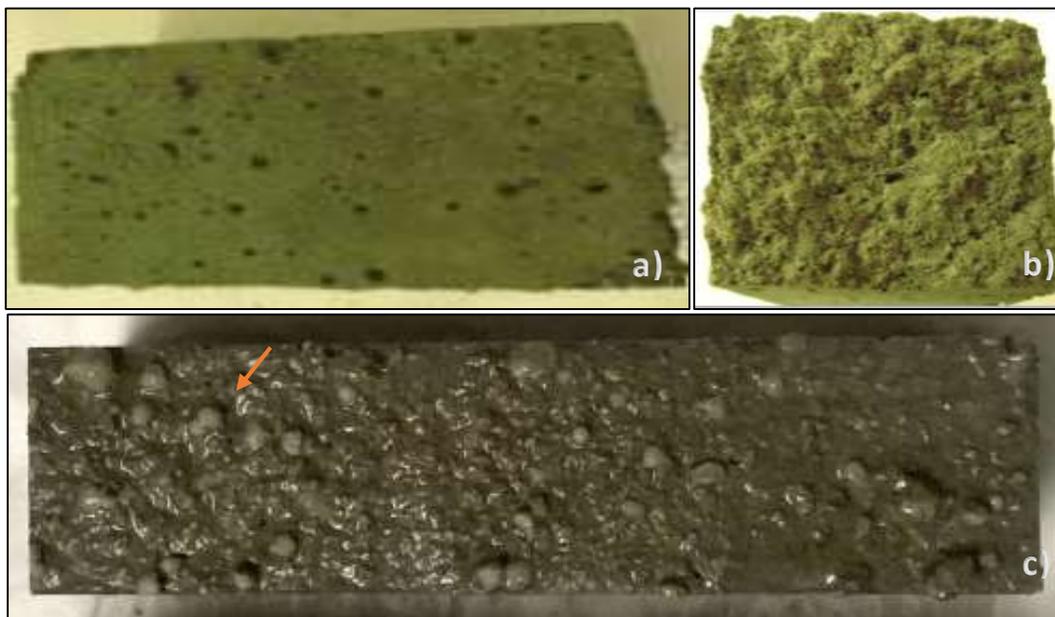


Figura 4. 23. Aspecto de mortero con Lamsize 5300 y Master Air (LMA), a) Superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda

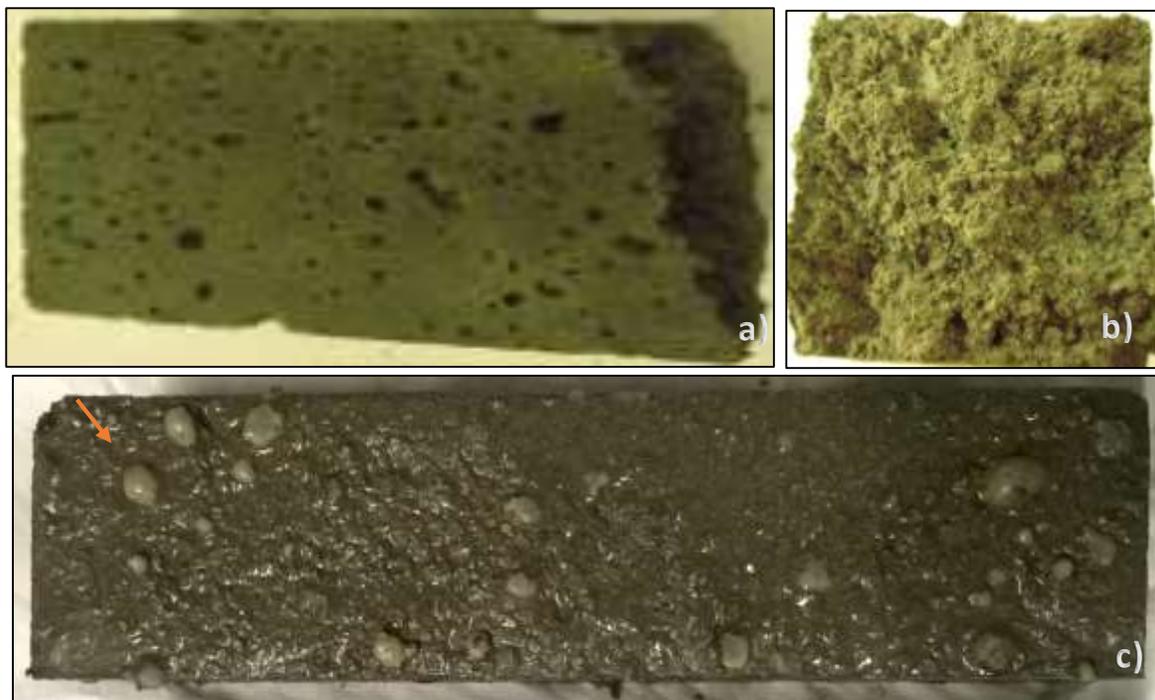


Figura 4. 24. Aspecto de morteros con Lamsize 5300 y Melmix (LM). a) Superficie de la probeta luego del desmolde a edad de 2 días, b) Interior de las probetas, c) probeta luego de 5 días en la cámara húmeda.

#### Morteros con urea y aditivos inclusores de aire

Dado la problemática del retraso en el fraguado por parte del mortero con adición de urea estudiado en la fase 2, se han estudiado en esta fase 6 morteros con nuevas dosificaciones, 3 de ellos disminuyendo el contenido de urea, y a 3 además, se les ha añadido acelerante de fraguado. También se ha añadido los aditivos aireantes Melmix I y Master Air 100, a manera de añadir porosidad a las mezclas y facilitar la salida de las sales que se pueden quedar alojadas en el interior de los morteros, ocupando los poros.

Así, mostrando los resultados de cada uno de los morteros con las dosificaciones de la Tabla 3.9 en las imágenes siguientes, se observa que a medida que se ha reducido el contenido de urea, los poros dejados por el material también presentan menor tamaño ya que estos logran disolverse más rápidamente, a medida que hay menos contenido de urea en la mezcla. Esta tendencia la siguen los morteros con y sin acelerante de fraguado, donde la mayor parte de la estructura porosa observada es producto de los aditivos aireantes.

Los morteros con 100 gramos de urea AU1, AU2 y AU4 (Figuras 4.25, 4. 26 y 4.28 respectivamente) y con 200 gramos de urea AU5 (Figura 4.29), no presentan poros con las dimensiones de los granos añadidos, así se nota que estos se habían disuelto completamente o casi totalmente durante el tiempo de amasado y antes del inicio del fraguado. Esta respuesta es lógica, debido a que la capacidad de disolución de la urea en agua es de 1.190 gramos /litro, o sea una relación 1,19 gramos de urea / 1 gramo de agua, habiendo suficiente agua de amasado para disolver la urea en los casos con 100 y 200 gramos.

Por otra parte, el morteros AU3 con 100 gramos de urea pero una menor cantidad de agua, presentan pocos poros con tamaños de los grano de urea, se señalan con flechas rojas en la Figura 4.27.b. Y el mortero AU6 que se han dosificado con 300 gramos de urea mostrados en la Figura 4.30.b, es el que más poros presenta ya que contiene menos agua y acelerante de fraguado, dando menos tiempo a la disolución de la urea antes del inicio del mismo.

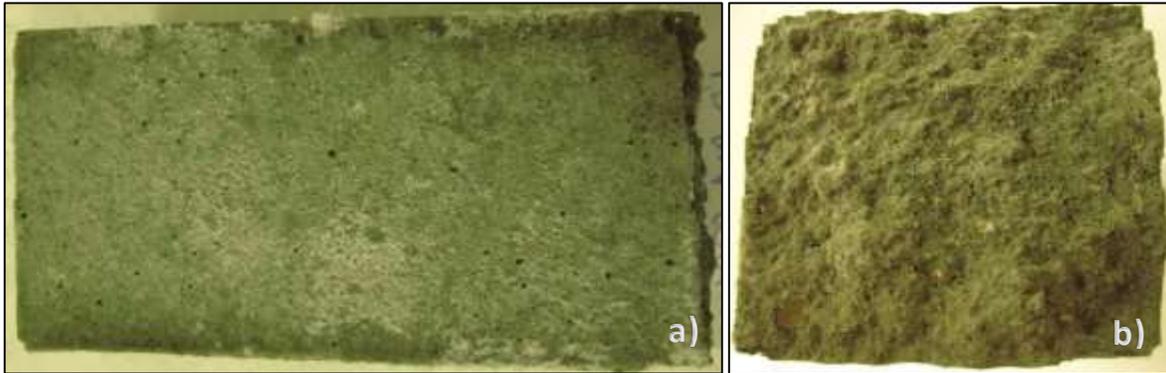


Figura 4. 25. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA1. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas

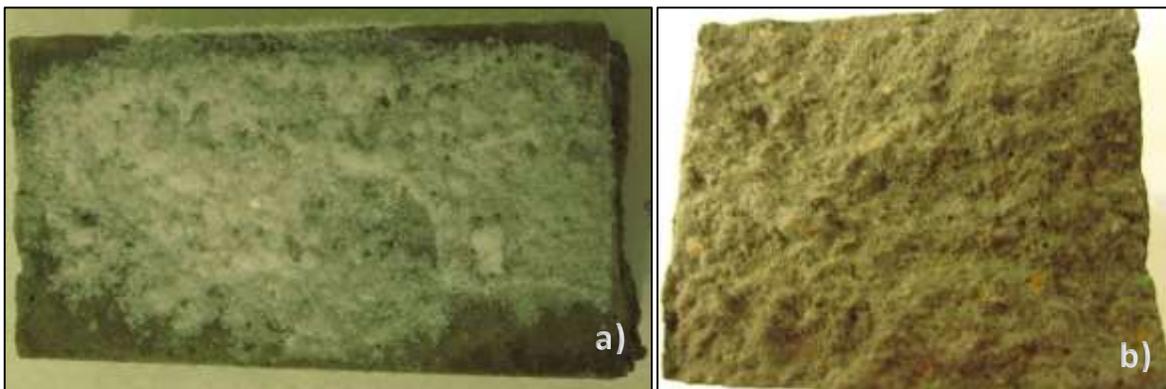


Figura 4. 26. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA2. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas

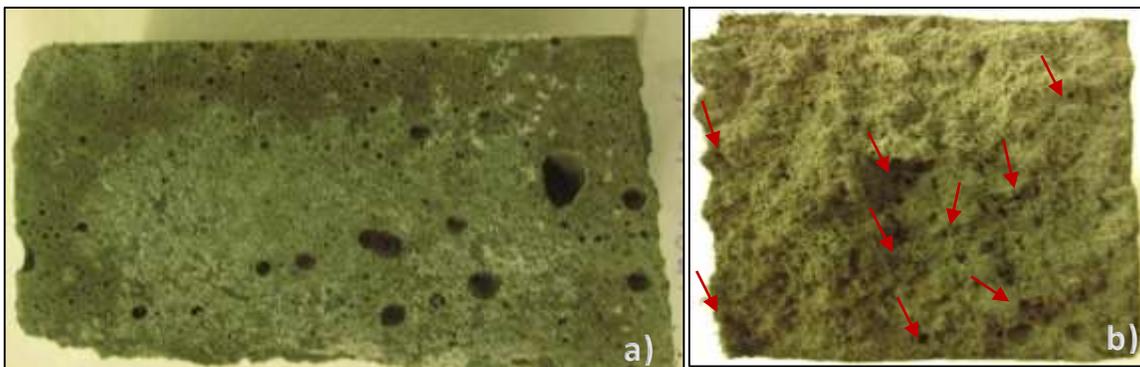


Figura 4. 27. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA3. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas

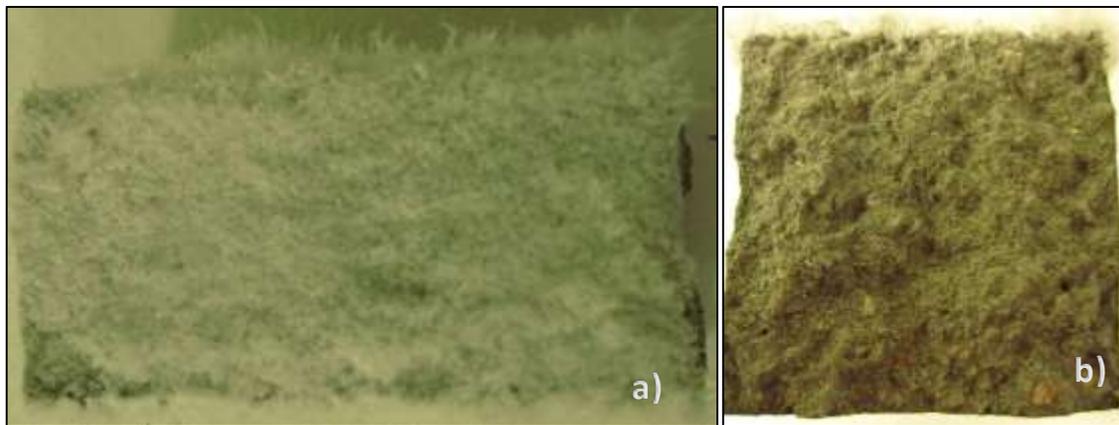


Figura 4. 28. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA4. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas

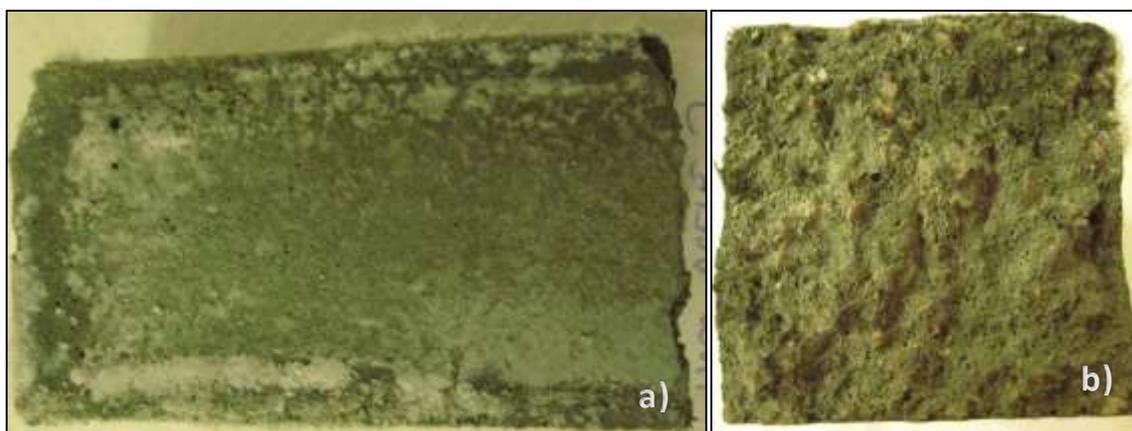


Figura 4. 29. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA5. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas

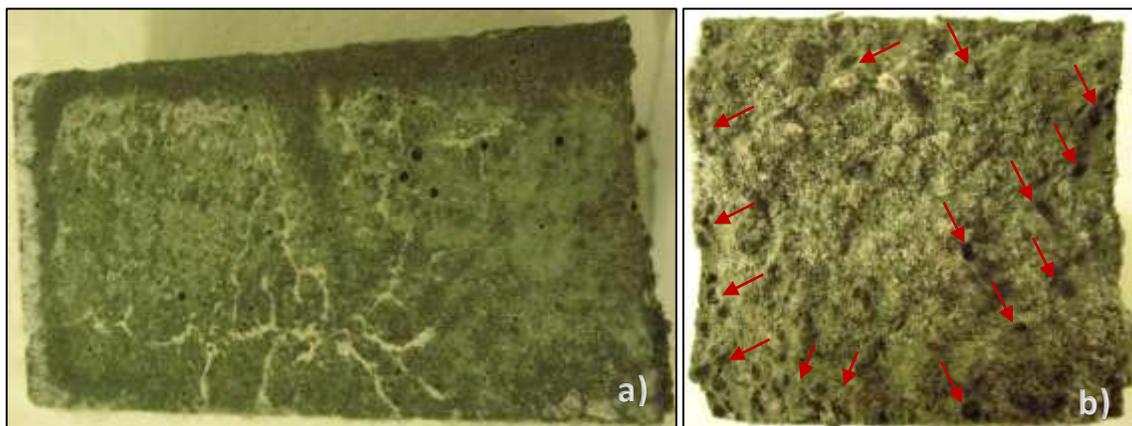


Figura 4. 30. Aspecto a edad de 4 días del Mortero UA6. a) Superficie de la probeta, b) Interior de las probetas

#### 4.5.2. Consistencia de la Mezcla

En las siguientes tablas se presentan las consistencias obtenidas para las diferentes dosificaciones de los morteros estudiados en esta Fase 4. La Tabla 4.2 muestra las consistencias de los morteros preparados a base de polisacáridos donde se ha encontrado, que en comparación con el mortero de referencia, estos áridos tienden a generar mezclas con consistencias más secas, entendiéndose así que la adición de los mismos deprimen la trabajabilidad de las mezclas en lugar de mejorarla.

Mortero	Relación Agua/Cemento	Escurrimiento de la mezcla (milímetros)	Límite (milímetros)	Consistencia
Mortero de Referencia	0,5	155,00	140 a 200	Plástico
SMA	0,69	146,30	140 a 200	Plástico
SM	0,69	139,20	<140	Seca
EMA	0,69	137,90	<140	Seca
EM	0,69	139,80	<140	Seca
LMA	0,69	149,90	140 a 200	Plástico
LM	0,69	148,50	140 a 200	Plástico

Tabla 4. 2. Consistencias de los morteros con áridos preparados a base de polisacáridos

Por su parte, los morteros con urea tienen a fluidificar las mezclas como se muestran en los resultados de la Tabla 4.3, indistintamente a la actuación del acelerante de fraguado y contenido de agua de amasado. Se observa que para dosificaciones de 200 y 300 gramos de urea, las mezclas pasan de ser plásticas a fluidas. Así se entiende que la forma esférica de los granos de urea contribuye a la manejabilidad de las mezclas.

Mortero	Relación Agua/Cemento	Escurrimiento de la mezcla (milímetros)	Límite (milímetros)	Consistencia
Mortero de referencia	0,50	155,00	140 a 200	Plástico
UA 1	0,50	160,20	140 a 200	Plástico
UA 2	0,50	169,50	140 a 200	Plástico
UA 3	0,35	156,50	140 a 200	Plástico
UA4	0,50	180,60	140 a 200	Plástico
UA5	0,50	215,80	>200	Fluida
UA6	0,40	218,90	>200	Fluida

Tabla 4. 3. Consistencias de los morteros con urea y aditivos inclusores de aire

#### 4.5.3. Tiempo de Fraguado de los Morteros

##### Morteros con áridos preparados en laboratorio a base de polisacáridos

En la siguiente Tabla 4.4 se muestran los tiempos de fraguado para los diferentes morteros con los áridos preparados a base de polisacáridos. En donde se observa que el tiempo de fraguado no ha disminuido respecto del mortero estudiado en la Fase 2, los polisacáridos estudiados en la Fase 4, retardan el fraguado en la misma magnitud que el almidón modificado.

Mortero	Cemento (gramos)	Arena (gramos)	Agua (gramos)	Polisacárido (gramos)	Tiempo de Fraguado
Normalizado	450	1350	225	--	12 horas
Con almidón modificado de la Fase 2	450	675	225	675	48 horas
SMA	310	945	214	170	48 horas
SM	310	945	214	170	48 horas
EMA	310	945	214	170	48 horas
EM	310	945	214	170	48 horas
LMA	310	945	214	170	48 horas
LM	310	945	214	170	48 horas

Tabla 4. 4. Tiempos de fraguado para los morteros preparados a base de polisacáridos

#### Morteros con urea y aditivos inclusores de aire

Como se observa en la Tabla 4.5 disminuir el contenido de urea reduce considerablemente el tiempo de fraguado, no así reducir el contenido de agua. De las dosificaciones sin acelerante de fraguado, el mortero UA3 con 155 gramos de agua, ha tardado 24 horas más en fraguar que las otras dos dosificaciones con 225 gramos para la misma dosificación. Así mismo se observa en los morteros con acelerante de fraguado en los que se ha ido añadiendo más urea, ha ido aumentando el tiempo de fraguado, mas también se evidencia la eficiencia del aditivo acelerante de fraguado.

Mortero	Cemento (gramos)	Arena (gramos)	Agua (gramos)	Urea (gramos)	Aditivo (gramos)	Acelerante (gramos)	Tiempo de Fraguado
Normalizado	450	1350	225		--	--	Antes de 24 horas
Con urea de la Fase 2	450	1350	225	675	--	--	5 días
UA1	450	1250	225	100	1,80	--	48 horas
UA2	450	1250	225	100	1,35	--	48 horas
UA3	450	1250	155	100	1,35	--	72 horas
UA4	450	1250	225	100	1,80	24	24 horas
UA5	450	1150	225	200	1,80	30	48 horas
UA6	450	1050	182	300	1,80	50	48 horas

Tabla 4. 5. Tiempos de fraguado para los morteros con urea y aditivos inclusores de aire

#### 4.5.4. Densidades, Porosidad Accesible al Agua y Resistencias Mecánicas de los Morteros con Urea

A continuación se presenta en la siguiente Tabla 4.6, los resultados sobre las mediciones de densidades, porosidad accesible al agua, y la media de las resistencias mecánicas de los morteros con urea tomadas para tres probetas a los 7 días. Ya que, debido al mal comportamiento de los áridos preparados a base de polisacáridos, es único material de la fase que ha sido evaluado hasta este punto.

Mortero	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Resistencia a flexión a 7 días (MPa)	Resistencia a compresión a 7 días (MPa)
Normalizado	2,36	2,01	14,96	6,40	33,80
Mortero con Urea de la Fase 2	1,90	1,66	12,5	2,60	9,30
UA1	2,14	1,94	9,05	3,50	11,00
UA2	1,98	1,76	11,19	4,30	14,90
UA3	1,85	1,59	13,78	2,80	11,50
UA4	2,16	1,87	13,38	3,10	10,30
UA5	2,01	1,72	14,22	2,40	12,10
UA6	1,73	1,46	15,76	2,00	9,50

Tabla 4. 6. Densidades, porosidad y resistencias de los morteros con urea

Sabiendo que a mayor densidad menor en el volumen de poros para el mismo volumen aparente, se puede evaluar la eficiencia en cuanto a absorción de una red de poros determinada en base a la relación entre la densidad aparente y el porcentaje de absorción. Así que si un mortero es más denso respecto de otro, y a la vez presenta un porcentaje mayor de absorción, significa que dentro de ese volumen menor de poros, hay una mayor cantidad de poros que pueden absorber agua. De esta manera, según lo que se puede apreciar en la Figura 4.31 se observa que el mortero AU4 respecto del UA2, y el AU5 respecto del UA3 y el mortero con urea de la Fase 2, presenta una red porosa más eficiente, ya que aun siendo más densas han sido capaces de absorber una mayor cantidad de agua.

Por otro lado, de forma general se observa una tendencia lógica de que los materiales menos densos, fueron los más absorbentes. Pero si se comparan todos los morteros que contienen urea con el mortero de normalizado, se puede decir que la red porosa obtenida mediante la adición de urea no es eficiente en cuanto a la absorción de agua, ya que siendo menos densa, ha absorbido menos agua. Esto puede ser causado por la ocupación de poros por las sales cristalizadas, producto de la disolución de la urea.

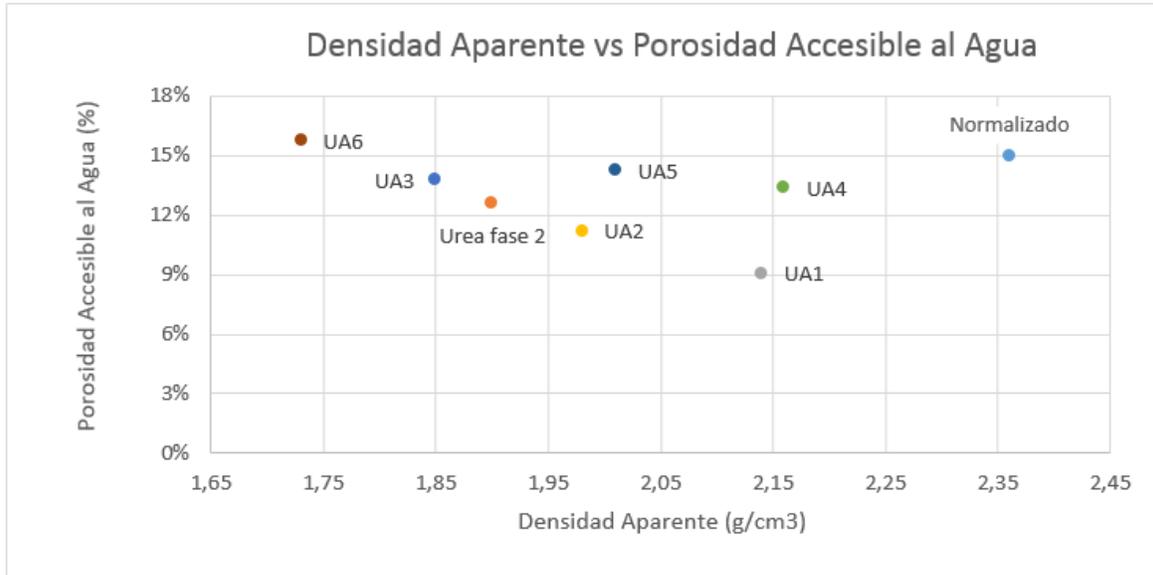


Figura 4. 31. Gráfico de densidad aparente vs porosidad accesible al agua de los morteros con urea

Analizando la relación en cuanto a la densidad y resistencias obtenidas, se observa en la Figura 4.32 que no necesariamente los morteros menos densos fueron menos resistentes. El mortero AU2 ha resultado ser el más resistente, mientras que el mortero con urea de la Fase 2 resulto ser el menos resistente. Así, se ha dado la tendencia de que la resistencia de los morteros ha sido inversamente proporcional al tamaño de los poros, más que a la densidad.

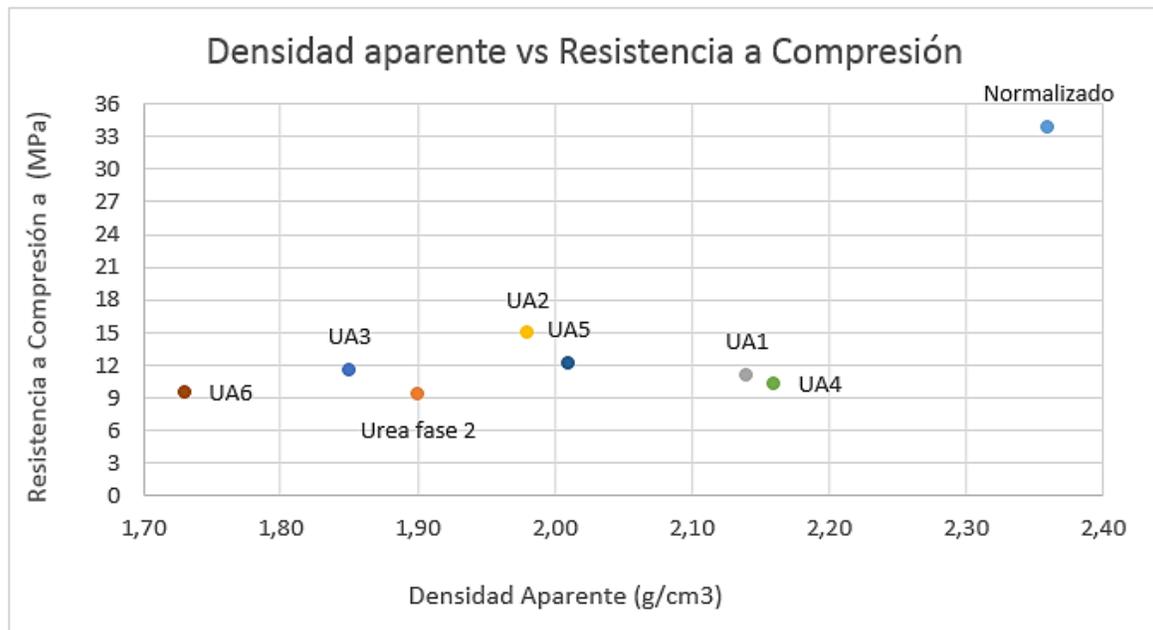


Figura 4. 32. Gráfico de la densidad aparente vs resistencia a compresión de los morteros con urea

#### 4.5.5. Conclusiones Parciales Sobre la Fase 4

En cuanto a los morteros con áridos preparados a bases de polisacáridos, podría decirse de acuerdo a los resultados mostrados, que no presentan una opción conveniente para considerarse como áridos solubles ya que presentan el mismo problema que la celulosa al tender a secar la mezcla, en vez de fluidificarla. Además las segregaciones vistas en las probetas han demostrado que no tendrían un buen comportamiento ante la presencia del agua debido a los geles formados por la gelatinización de los polisacáridos en la matriz del mortero. En lo referente al tiempo de fraguado, tampoco se ha encontrado avance, ya que los morteros han fraguado dentro de las mismas 48 horas que el mortero estudiado en la Fase 2 con el almidón modificado.

Por otra parte en cuanto a los morteros con urea, se ha encontrado que reducir el contenido del material, mejora las problemáticas presentadas en las fases anteriores en cuanto al retraso del fraguado y la formación de sales. Pero esto al mismo tiempo reduce considerablemente la cantidad de poros, ya que debe haber suficiente cantidad de urea versus la cantidad de agua, para que una vez culmine el fraguado, queden gránulos suficientes para que se disuelvan en la matriz del mortero ya endurecido.

En cuanto a las consistencias de estos morteros se ha observado que la forma esférica de urea contrario a los áridos preparados a base de polisacáridos, tienen a fluidificar las mezclas de forma considerable. De manera que cumple la función que desempeñarían los típicos áridos finos no solubles en aspectos de trabajabilidad, pero con más capacidad de fluidificación que tendría la misma fracción de arena.

Si se comparan todos los morteros que contienen urea con el mortero de normalizado, se puede decir que la capacidad de absorción de la red porosa puede verse limitada por la ocupación de poros por las sales cristalizadas, producto de la disolución de la urea. Y que la resistencia mecánica se ve más deprimidas por el tamaño del poro que por la cantidad de vacíos presente en la estructura de los morteros.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES GENERALES

Una vez desarrolladas las cuatro fases de la campaña experimental de la presente investigación, se han resuelto las siguientes conclusiones:

En lo que respecta a los ensayos de solubilización para evaluar la cinética de disolución:

- Las muestras que han proporcionado una cinética de disolución dentro de lo aceptable han sido la urea y el almidón Flo-Pak Bio. La urea es el único material que ha demostrado ser capaz de disolverse completamente en el medio alcalino de ensayo.
- Las arcillas zeolita y sepiolita pueden bien ser descartadas como materiales candidatos a ser áridos solubles, debido a que no mostraron la capacidad de disolverse en medios alcalinos.
- El polímero termoplástico y la celulosa han mostrado ser parcialmente solubles en la solución alcalina. Pero el polímero saturar el medio de disolución debido a la misma formación de gel.

En lo que respecta a la interacción con los morteros:

- La urea es el material, entre los candidatos a ser árido soluble estudiados en esta investigación, que ha presentado resultados más favorables en cuanto a la formación de una red porosa interconectada.
- El polímero termoplástico, al entrar en contacto con medios alcalinos, forma un gel expansivo capaz de agrietar la estructura de los morteros.
- El almidón en polvo Flo-Pak Bio, modificado como granos en el laboratorio, no se disuelve en el seno de los morteros, debido a la granulometría muy gruesa y falta de porosidad en su estructura.
- Los polisacáridos con granulometrías muy finas, la celulosa en forma de fibra y polisacáridos en polvos, tienden a desecar las mezclas, dificultando la trabajabilidad de los morteros y aumentando la demanda de agua de amasado.

- En cuanto a los áridos preparados en laboratorio a base de polisacáridos y aditivos inclusores de aire, no se han considerado los resultados como favorables dado a la formación de geles degradantes del mortero y reduce la trabajabilidad de las mezclas
- Tanto la urea, los almidones, como y los polisacáridos que son derivados de guar estudiados en esta investigación, retrasan el fraguado de los morteros.
- La urea es, entre los candidatos estudiados, el material que más tiende a retardar el fraguado de los morteros.
- Una vez termina el proceso de fraguado en los morteros con urea, se forman sales como productos de su disolución, que cristalizan y colmatan la red porosa. Estas sales son fácilmente lavables con flujo de agua.
- En cuanto a los morteros con urea y aditivos inclusores de aire se ha encontrado que la incorporación los aditivos facilita la salida de las sales desde el interior de las probetas con urea, reduciendo la colmatación de la red porosa.
- Para garantizar una mínima formación de poros a través de la disolución controlada de la urea en el seno de los morteros luego del inicio de fraguado, debe mantenerse la relación urea / agua por encima del 65%.
- En los morteros, el retraso en el fraguado, formación de sales y fluidificación de la mezcla, serán directamente proporcionales al contenido de urea.
- Una menor densidad no garantiza la mayor absorción de agua en los morteros con urea, al igual que tampoco genera una menor resistencia. Sino que la resistencia será más susceptible al tamaño del poro, que al volumen total de vacíos presente en las mezclas.

## 5.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los resultados de esta tesina debe tomarse como los primeros pasos a seguir en la investigación de desarrollo de árido soluble para hormigones porosos, a partir de la cual se dan las siguientes recomendaciones:

- Se aconseja utilizar como medio de simulación efectivo del medio alcalino la solución acuosa con elevado PH, ya que los seis materiales empleados como solutos, se comportaron de idéntica forma una vez habían interactuado con los morteros. Esto permitiría predecir parte del comportamiento de los solutos en el seno de los morteros.
- Al ser la urea el material que presenta los resultados más prometedores, se recomienda continuar con los estudios sobre este material, intentando conseguir un balance entre el contenido de urea y contenido de agua, que garantice un índice de porosidad y tiempo de disolución controlado. Además sería prudente evaluar los resultados de los morteros con urea añadiendo aditivos inhibidores de formación de sales.
- También, se propone como estudio futuro la búsqueda de un material de recubrimiento para la urea que no sea soluble en agua, pero que lo sea en un medio alcalino, como una forma de superar la problemática de la disolución de la urea muy rápidamente con el agua de amasado. Además evitaría la posibilidad de que las reacciones endotérmicas que experimenta la urea al disolverse antes de iniciar el fraguado, disminuyan la temperatura en los morteros, refrenando las reacciones de hidratación del cemento.
- Es aconsejable, antes de pensar en evaluar mezclas de hormigones, continuar las investigaciones en morteros con la urea y otros materiales, a manera de disminuir la posible disociación entre esta línea investigativa y líneas futuras. Y además, evitar el gasto de materiales antes de obtener soluciones óptimas para mezclas porosas y autocompactantes.
- De la misma forma se recomienda, en el caso de expandir la línea investigativa a nuevos candidatos para ser áridos solubles, evitar en ellos las siguientes características: la capacidad de disolverse en el agua, la tendencia a absorber y almacenar agua, la tendencia a formar geles en contacto con el agua y medios alcalinos, el contenido de polisacáridos ya que están basados en azúcares retardantes de fraguado.
- Por otra parte, serían convenientes materiales con gránulos forma esférica para contribuir a la trabajabilidad de la mezcla. Pero con una granulometría controlada para facilitar la disolución y formación de poros, cuidando la generación de poros de tamaño muy grande que puedan afectar excesivamente la resistencia mecánica de las mezclas.

## BIBLIOGRAFÍA

AENOR, 1996. *UNE-EN 196-1. Métodos de Ensayo de Cementos. Parte 1: Determinación de Resistencias Mecánicas.*, Madrid: AENOR.

AENOR, 2000. *UNE-EN-1015-3. Métodos de Ensayo para Morteros de Albañilería. Parte 3: Determinación de la Consistencia del Mortero Fresco (por la mesa de sacudidas).*, Madrid: AENOR.

AENOR, 2014. *UNE 83980: Determinación de la Absorción de Agua, La Densidad y La Porosidad Accesible al Agua del Hormigón*, Madrid: AENOR.

Aguado, A. & Agulló, L., 2002. *Anales de Construcciones y Materiales Avanzados*. Barcelona: E.T.S Ingenieros de Caminos Canales y Puertos Universidad Politécnica de Cataluña.

Aguado, A. & Agulló, L., 2011. *Anales de Construcciones y Materiales Avanzados*. Barcelona: E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Cataluña.

Almeida, A. E. & Sichert, E. P., 2006. *Thermogravimetric Analyses and Mineralogical Study of Polymer Modified Mortar with Silica Fume*, Sao Paulo: Materials Resarch.

Álvarez, J. I., 2014. *Empleo de Aditivos para Mejora de las Propiedades de los Morteros de Cal*, Madrid: Materiales Inorgánicos & Medio Ambiente Departamento de Química y Edafología. Universidad de Navarra.

Androff, N. W., Francis, L. F. & Velamakanni, B. V., 1997. *Macroporous Ceramics from Ceramic-Polymer Dispersion Methods*, Minneapolis, Minnesota: AIChE Journal.

Anon., 2015. *Club Ensayo*. [En línea] Available at: <https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Pavimentos-Permeables/2358857.html> [Último acceso: 9 Noviembre 2015].

Bhutta, M. A. R., Tsuruta, K. & Mirza, J., 2011. *Evaluation of High-performance Porous Concrete Properties*, Kuala Lumpur: Construction and Building Materials.

Curso de Estudios Mayores de la Construcción, 1998. *Hormigones Especiales*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

Deo, O. & Neithalath, N., 2011. *Compressive Response of Previous Concretes Proportined for Desired Porosities*, Potsdam, NY: Construction and Building Materials .

Dogén, J. M. R., 2014. *Optimización de las Propiedades Mecánicas y Drenables del Hormigón Poroso*, Barcelona: E. T. S. de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

Fey, T., 2012. *Glass and Ceramics*, Erlangen-Nuremberg: Materials Scince and Engineering.

Gaucher, E. C. & Blanc, P., 2006. *Cement/Clay Interactions- A review: Experiments, Natural analogues and Modeling*, Orleans Cedex: Waste Management.

- Gerharz, B., 1999. *Pavements on the Base of Polymer-Modified Drainage Concrete*, Frankfurt: Colloids and Surfaces.
- Han, J. & Lim, S. T., 2004. *Structural Changes in Corn Starches During Alkaline Dissolution by Vortexing.*, South Korea: Carbohydrate polymers, Korean University.
- Huang, B., Wu, H., Shu, X. & Burdette, E. G., 2010. *Laboratory Evaluation of Permeability and Strength of Polymer-modified Previous Concrete*, Knoxville: Construction and Building Materilas.
- Juenger, M. C. G. & Jennings, H. M., 2002. *New Insights into the Effects of Sugar on the Hydration and Microstructure of Cement Pastes*, California: Cement and Concrete Research,.
- Lian, C. & Zhuge, Y., 2010. *OPTimum Mix Desing of Enhanced Permeable Concrete-An Experimental Investigation* , Adelaide: Construction and Building Materials .
- Loon, L. R. V. & Glaus, M. A., 1997. *Review of the Kinetics of Alkaline Degradation of Cellulose in View of its Relevance for Safety Assessment*, s.l.: Journal of Enviromental Polymer Degradation.
- Lopes, R. A. & Segadaes, A. M., 1996. *Microstructure, Permeability and Mechanical Behaviour of Ceramic Foams*, Aveiro, Portugal: Materials Science and Engineering .
- Mindess, S., Young, F. J. & Darwin, D., 2002. Concrete. En: U.S.A: Prentice Hall, Pearson Education.
- Okada, K. y otros, 2009. *Capillary Rise Properties Mullite Ceramics Prepared by an Extrusion Method Using Organic Fibers as the Pore Former*, Tokyo: Journal of the European Ceramic Society.
- Pazos, I. M., Hernandez, F. & Vazquez, F. T., 1992. *Colmatación de Poros en Morteros de Cemento por Tratamientos Químicos y Desecación a Distintas Temperaturas*, Madrid: ETSICCPM, ICET/CSIC.
- Peng, H. X., Fan, Z., Evans, J. R. G. & Busfield, J. J., 2000. *Microstructure of Ceramic Foams.* , Uxbridge, UK: Journal of the European Ceramic Society.
- Peschard, A. y otros, 2004. *Effect of Polysaccharides on the Hydration of Cement Paste at Early Ages*, s.l.: Cement and Concrete Composites.
- Ramachandran, V. S., 1995. *Concrete Admixtures Handbook- Properties, Science and Technology*, Ottawa: William Andrew Publishing/Noyes.
- Ripollés, J. D., Selvas, J.-J. R. i. & Cea, A. A. d., 1987. *Aproximación al Hormigón Poroso*, Barcelona: s.n.
- Toledo, F., Scrivener, K. & England, G. L., 2000. *Durability of Alkali-Sensitive Sisal and Coconut fibres in Cemen paste at early ages*, s.l.: Cement and concrete Research.
- Yang, J. & Jiang, G., 2003. *Experimental Study on properties of Previous Concrete pavement Materials.*, Beijing: Cement and Concrete Research.

# ANEXOS: FICHAS DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

## Anexo A: Zeolita

	<p>Ficha Técnica</p> <p><b>Zeolita Natural AGRO®</b></p>	
---	--	---

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Nombre del Producto	Zeolita Natural AGRO
Descripción del producto	Zeolita Natural, clinoptilolita – granulada.
Granulometrías disponibles	0,6 - 1,5 mm, 1,5 - 3 mm, y 3 - 5 mm
Nombre químico	Aluminosilicato cálcico potásico magnésico hidratado.
Numero CAS	12173-10-3

CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS	
Componente principal	Clinoptilolita 88 - 95% (Análisis DRX)
Otros componentes	Montmorillonita 2-5%, Feldespatos, 3-5%, Moscovita 0-3%, Cristobalita 0-2%
Color	Marfil
Densidad de la roca	2000 - 2400 kg/m <sup>3</sup>
Dureza MOHS	2,0 - 3,0

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS																	
Composición química	<table border="0"> <tr> <td>SiO<sub>2</sub> : 65 - 72 %</td> <td>Metales pesados:</td> </tr> <tr> <td>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 10 - 12 %</td> <td>As &lt;7 ppm</td> </tr> <tr> <td>K<sub>2</sub>O : 2,3 - 3,5 %</td> <td>Cd &lt;1 ppm</td> </tr> <tr> <td>CaO : 2,5 - 3,7%</td> <td>Pb &lt;30 ppm</td> </tr> <tr> <td>MgO : 0,9 - 1,2%</td> <td>Hg &lt;0,1 ppm</td> </tr> <tr> <td>Na<sub>2</sub>O : 0,3 - 0,65 %</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 0,8 - 1,9 %</td> <td></td> </tr> <tr> <td>TiO<sub>2</sub> : 0 - 0,10 %</td> <td></td> </tr> </table>	SiO <sub>2</sub> : 65 - 72 %	Metales pesados:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 10 - 12 %	As <7 ppm	K <sub>2</sub> O : 2,3 - 3,5 %	Cd <1 ppm	CaO : 2,5 - 3,7%	Pb <30 ppm	MgO : 0,9 - 1,2%	Hg <0,1 ppm	Na <sub>2</sub> O : 0,3 - 0,65 %		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,8 - 1,9 %		TiO <sub>2</sub> : 0 - 0,10 %	
SiO <sub>2</sub> : 65 - 72 %	Metales pesados:																
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 10 - 12 %	As <7 ppm																
K <sub>2</sub> O : 2,3 - 3,5 %	Cd <1 ppm																
CaO : 2,5 - 3,7%	Pb <30 ppm																
MgO : 0,9 - 1,2%	Hg <0,1 ppm																
Na <sub>2</sub> O : 0,3 - 0,65 %																	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,8 - 1,9 %																	
TiO <sub>2</sub> : 0 - 0,10 %																	
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	1,5 a 1,9 meq/g																
Porosidad Aparente	45 - 50 %																
Superficie Específica (Método BET)	70 - 80 m <sup>2</sup> /g																
pH (10% en agua)	7 - 8																
Estabilidad Térmica	> 450 °C																
Estabilidad Química (pH)	3 < pH < 11																
Densidad Aparente	0,85 g/cm <sup>3</sup>																

Presentación del Producto	
Tipo de Envase	Sacos de PP de 25 kgs. Palets de 40 sacos (1000 kgs). Bigbags de 1000kgs.

Aplicaciones Recomendadas	
Medio de cultivo, sustratos, tratamiento de suelos, productos agrícolas ecológicas, construcción y mantenimiento de campos de golf medio absorbente para animales, absorbente industrial, deshumidificante.	

Zeocat Soluciones Ecológicas S.L.U. C/Mossen Cinto Verdaguer, 40 08460 Santa Maria de Palautordera Barcelona, España.	Tel: (0034) 93 848 2594 Fax: (0034) 93 848 3838 <a href="http://www.zeolitanatural.com">www.zeolitanatural.com</a> <a href="http://www.zeocat.es">www.zeocat.es</a>
--	--

## Anexo B: Sepiolita

## SEPIOLITA 15/30

### ANALISIS QUIMICO ( % de muestra secada a 105° C)

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>48.0</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0.3</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>7.2</b>	<b>MnO</b>	<b>0.01</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>1.2</b>	<b>P.C.</b>	<b>18.49</b>
<b>MgO</b>	<b>13.2</b>		
<b>CaO</b>	<b>10.9</b>		
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0.3</b>		
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0.4</b>		

(\*Tolerancia de ± 20 % en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO)

### CARACTERISTICAS FISICAS.

	<b>TOLERANCIAS</b>
<b>HUMEDAD</b>	<b>5 - 10 %</b>
<b>ABSORCION DE AGUA</b> (Met. Westinghouse)	<b>105 - 120 %</b>
<b>ABSORCION DE ACEITE</b> (Met. Westinghouse)	<b>45 - 70 %</b>
<b>pH</b>	<b>8.3 - 8.7</b>
<b>DENSIDAD APARENTE</b>	<b>700 - 850 g/l</b>
<b>GRANULOMETRIA</b>	
<b>Superior a 15 msh</b>	<b>1 - 3 %</b>
<b>Inferior a 60 msh</b>	<b>2 - 5 %</b>
<b>15/60 msh</b>	<b>92 - 97 %</b>



## Anexo D: Aditivo Master Air 100



The Chemical Company

## MasterAir 100

Antes: MICRO-AIR 100

Aditivo inclusor de aire para hormigón y mortero.

Propiedades	
Función principal:	Inclusor de aire.
Efecto secundario:	Posible pérdida de resistencias mecánicas.
Aspecto físico:	Líquido ámbar - marrón.
Densidad aparente, 20° C:	1,010 ± 0,02 gr/cm <sup>3</sup>
Contenido en cloruros:	< 0,1 %

### SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

#### 9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Estado físico:	líquido
Color:	ámbar
Olor:	característico
Umbral de olor:	No hay información aplicable disponible.
Valor pH:	aprox. 9,0 - 11,5 (20 °C)
<i>Indicaciones para: agua</i>	
Punto de fusión:	0 °C
<i>Indicaciones para: agua</i>	
Punto de ebullición:	100 °C
Punto de inflamación:	No inflamable.
Velocidad de evaporación:	no determinado
Temperatura de ignición:	no aplicable
Presión de vapor:	1,01 hPa (20 °C)
Densidad:	aprox. 1,022 g/cm <sup>3</sup> (aprox. 20 °C)
Densidad relativa de vapor (aire):	no determinado
Solubilidad en agua:	miscible (20 °C)
Descomposición térmica:	Ninguna descomposición, si se almacena y aplica como se indica/está prescrito.
Viscosidad, dinámica:	aprox. 10 mPa.s (aprox. 20 °C)

## Anexo E: Aditivo Melmix I



## Melmix I

Aditivo aireante/plastificante para mortero estabilizado **MORMIX**.

### SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

#### 9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Estado físico:	líquido
Color:	pardo
Olor:	característico
Umbral de olor:	No hay información aplicable disponible.
Valor pH:	aprox. 5 (20 °C)
Temperatura de fusión:	aprox. 0 °C
Indicaciones para: agua	
Punto de fusión:	0 °C
Temperatura de ebullición:	aprox. 100 °C
Indicaciones para: agua	
Punto de ebullición:	100 °C
Punto de inflamación:	Debido al elevado contenido en agua no es necesaria la determinación del punto de inflamación.
Velocidad de evaporación:	no determinado
Flamabilidad:	no inflamable
Temperatura de ignición:	no aplicable
Indicaciones para: agua	
Presión de vapor:	23,4 hPa (20 °C) Indicación bibliográfica.
Densidad:	1,08 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Densidad relativa de vapor (aire):	no determinado
Solubilidad en agua:	miscible (20 °C)
Descomposición térmica:	Ninguna descomposición, si se almacena y aplica como se indica/está prescrito.
Viscosidad, dinámica:	< 40 mPa.s (20 °C)
Riesgo de explosión:	no existe riesgo de explosión

## Anexo F: Aditivo MasterCell 10



The Chemical Company

## MasterCell 10

Antes: RHEOCELL ESPUMANTE

Aditivo espumante para hormigón celular.

### SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

#### 9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Estado físico:	líquido
Color:	inoloro hasta amarillento
Olor:	inodoro
Umbral de olor:	No hay información aplicable disponible.
Valor pH:	aprox. 6 - 8 (20 °C)
Temperatura de fusión:	El producto no ha sido ensayado.
Temperatura de ebullición:	aprox. 100 °C
Punto de inflamación:	El producto no ha sido ensayado.
Velocidad de evaporación:	no determinado
Flamabilidad:	no inflamable
Temperatura de ignición:	no aplicable
Presión de vapor:	El producto no ha sido ensayado.
Densidad:	aprox. 1,04 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Densidad relativa de vapor (aire):	no determinado
Descomposición térmica:	Ninguna descomposición, si se almacena y aplica como se indica/está prescrito.
Viscosidad, dinámica:	no determinado

#### 9.2. Información adicional

Peso específico:	no aplicable
Miscibilidad con agua:	(20 °C) miscible
Otra información:	Si es necesario, en esta sección se indica información sobre otras propiedades físico-químicas.

## Anexo G: Aditivo Glupocon 215

**Cognis Iberia, s.l.**

Ficha de Datos de Seguridad según la Directiva 91/155/CEE - ISO 11014-1

página 1 de 5

Nº SDB : 11050

Revisión: 29.08.2005

Fecha de impresión: 02.03.2006

**GLUCOPON 215 CS UP****1. Identificación de la sustancia o preparado y de la sociedad o empresa**

**Nombre comercial:**  
GLUCOPON 215 CS UP

**Uso:**  
Tensioactivos

**Denominación de la empresa:**  
Cognis Iberia, s.l.  
Pol. Ind Sant Vicenç  
08755 CASTELLBISBAL (Barcelona) Spain  
Teléfono: +34937730000

**Información de emergencia:**  
+34 93 479 4850

**2. Composición / información sobre los componentes**

**Descripción química general:**  
Preparación acuosa de: Alkyl polyglycoside.

**Indicación de componentes:**

Valor (94)	Denominación	Símbolo	Frase: E	NOTA	número CE
>= 50	<= 70 Alkyl polyglycoside ; 68515-73-1	Xi	R41		

**9. Propiedades físicas y químicas**

Denominación	Valor	Ensayado según
Forma de suministro:	líquido	
Nanunleza:	líquido	
Olor:	casi inodoro	
Color(es):	amarillo	
Valor pH (20 °C; Conc.: 10 g/l; Disolvente: Agua)	11,5 - 12,5	DGF H-III 1 (92)
Punto de inflamación	> 100,0 °C	no hay datos
Solubilidad cualitativa (20 °C; Disolvente: Agua)	Soluble de forma ilimitada	no hay datos

## Anexo H: Almidón Special Starch 6007

Information Service **SUDSTARKE**



## Specification

### Special Starch 6007

**Product description:** white powder, Smell/Taste neutral

**Declaration:** Starch (physically modified)

**Product composition:** see 2. page  
SO<sub>2</sub> – Content: max. 10 ppm

**Minimum durability:** 24 month (dry storage, room temperature)

**Remarks:** soluble in cold water,  
gluten free, kosher and halal  
heavy metals content according to EU-Norms  
product is GMO free

**Microbiological data:**

Total viable count:		max. 5 000/g
Yeasts / moulds:		max. 200/g
E. coli:		absent in 1 g
Salmonellas:		absent in 25 g

Parameter	Analysis method	Tolerance
Moisture	001 (Infra-red moisture analyser )	max. 7 %
pH-value	504 (5 %ig in dist. water)	6,0 – 8,0
Sieve analysis	554 (sieve 500 µm) 557 (sieve 63 µm)	max. 10 % > 500 µm max. 20 % < 63 µm
Viscosity	512 (5 %, with Brookfield)	1.000 – 4.000 mPa s

Version 6, 06.09.2011 page 1 of 2  
 Spec Spezialst 6007 Avog. 6 engl  
 Südstärke GmbH – P.O box 1240 – 86522 Schrobenhausen – Telefon (0 82 52) 9 13-0  
 Königsacker Weg 2-6 – 86529 Schrobenhausen – Fax (0 82 52) 9 13-1 18  
 www.suedstaerke.de – e-mail: info@suedstaerke.de

All information given in this paper is accurate to the best of the present knowledge. We cannot bear any guarantee for the execution of our products. The user must analyse or test other products. It shall not later into account eventual change of priority of this.

## Anexo I: Polisacárido Esacol



**lamberti**  
chemical specialties

Safety data sheet  
ESACOL HS 30 R

Ficha de datos de seguridad del 13/11/2015, Revisión 1

Fecha de impresión: 15/12/2015

---

**SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa**

1.1. Identificador del producto

Nombre comercial: ESACOL HS 30 R  
Código comercial: F006390  
Composición química: Derivado de polisacárido de origen natural.

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Uso recomendado:

Usos industriales

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Proveedor:  
LAMBERTI S.p.A. - Via Piave 18 - 21041 Albizzate (VA)  
Tel.: +39 0331 715 111 - Fax.: +39 0331 775 577 - e-mail: hse@lamberti.com

Persona competente responsable de la ficha de datos de seguridad:

hse@lamberti.com

1.4. Teléfono de emergencia

LAMBERTI S.p.A. - Tel. : +39 0331 715 111 - 24h

---

**SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**

9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Aspecto y color: Polvo  
Olor: No  
Umbral de olor: N.D.  
pH: 6,5 (20 g/l )  
Punto de fusión/congelamiento: N.D.  
Punto de ebullición inicial e intervalo de ebullición: N.A.  
Inflamabilidad sólidos/gases: N.D.  
Límite superior/inferior de inflamabilidad o explosión: N.D.  
Densidad de los vapores: N.D.  
Punto de ignición (flash point, fp): N.A.  
Velocidad de evaporación: N.D.

Presión de vapor: N.D.  
Densidad relativa: N.D.  
Hidrosolubilidad: Soluble.  
Solubilidad en aceite: N.D.  
Coeficiente de reparto (n-octanol/agua): N.D.  
Temperatura de autoencendido: N.D.  
Temperatura de descomposición: N.D.  
Viscosidad: N.D.  
Propiedades explosivas: N.D.  
Propiedades comburentes: N.D.

9.2. Información adicional

Miscibilidad: N.D.  
Liposolubilidad: N.D.  
Conductibilidad: N.D.  
Propiedades características de los grupos de sustancias: N.D.

---

## Anexo J: Polisacárido Lamsize



**lamberti**  
chemical specialties

Safety data sheet  
LAMSIZE 5300 MC

Safety Data Sheet dated 20/4/2015, version 1

Printing date: 17/12/2015

---

**SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking**

1.1. Product identifier

Trade name: LAMSIZE 5300 MC  
MSDS code: F006589  
Chemical description: Natural polysaccharide.

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Recommended use:

Industrial uses:

1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

Supplier:  
LAMBERTI S.p.A. - Via Piave 18 - 21041 Albizzate (VA)  
Tel.: +39 0331 715 111 - Fax.: +39 0331 775 577 - e-mail: hse@lamberti.com

Competent person responsible for the safety data sheet:

hse@lamberti.com

1.4. Emergency telephone number

LAMBERTI S.p.A. - Tel. : +39 0331 715 111 - 24h

---

**SECTION 9: Physical and chemical properties**

9.1. Information on basic physical and chemical properties

Appearance and colour: Powder  
Odour: Characteristic  
Odour threshold: N.D.  
pH: 6 - 7,5 (10 g/l)  
Melting point / freezing point: N.D.  
Initial boiling point and boiling range: N.A.  
Solid/gas flammability: N.D.

Upper/lower flammability or explosive limits: N.D.

Vapour density: N.D.

Flash point: N.A.

Evaporation rate: N.D.

Vapour pressure: N.D.

Relative density: N.D.

Solubility in water: Soluble

Solubility in oil: N.D.

Partition coefficient (n-octanol/water): N.D.

Auto-ignition temperature: N.D.

Decomposition temperature: N.D.

Viscosity: N.D.

Explosive properties: N.D.

Oxidizing properties: N.D.

9.2. Other information

Miscibility: N.D.

Fat Solubility: N.D.

Conductivity: N.D.

Substance Groups relevant properties: N.D.

---