

Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras

tesis doctoral realizada por:
Francisco Mena Sebastiá

dirigida por:
Antonio Aguado de Cea
Albert de la Fuente Antequera
Ignacio Segura Pérez

Barcelona, Junio 2015

Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria de la Construcció

TESIS DOCTORAL



Curso académico:

Acta de calificación de tesis doctoral

Nombre y apellidos FRANCISCO MENA SEBASTIÀ
Programa de doctorado ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ
Unidad estructural responsable del programa DEPARTAMENT D'ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de la su tesis doctoral titulada
CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO MIXTO REFORZADO CON FIBRAS

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

NO APTO APROBADO NOTABLE SOBRESALIENTE

Table with 4 rows and 2-3 columns for signatures of Tribunal members: Presidente/a, Secretario/a, and three Vocals.

_____, ____ de _____ de _____

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

SÍ NO

Table with 2 rows and 2 columns for signatures of the Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado: Presidente and Secretario.

Barcelona a _____ de _____ de _____

*“No hay que valorar las cosas que posees por el dinero que cuestan,
sino por el esfuerzo y tiempo que has dedicado para conseguirlas”*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Antonio Aguado, Albert de la Fuente e Ignacio Segura, por su apoyo, paciencia e indicaciones dadas durante estos últimos tres años. Además de todo esto (que no es poco), brindarme la posibilidad de realizar el Doctorado con un grupo de personas tan excepcional como el que forma el Departamento de Ingeniería de la Construcción me ha permitido evolucionar como persona.

También quiero agradecer el compañerismo de todos los amigos que he conocido durante esta etapa de mi vida, y que espero que perduren en el tiempo. Como la lista es larga espero no dejarme ninguno (y si lo hago, que sepan perdonarme): Pablo, Isaac, Ricardo, Martha, Júlia, Renan, Rubén, Francesc, Jordi, Sandra, Ana, Sergio, Nayara, André, Juliana, Liao, Ahmed, Luis, Razmik, Amin, Yohei, Carlos, Edu, Tina y Tai.

Además, quiero acordarme de otros amigos de fuera del Departamento y de la “vida real”, que me han apoyado y animado para no rendirme, por saber comprenderme y entenderme, a pesar de las numerosas negativas que les he dado, principalmente en los últimos meses de “encierro”: Nanno, Dani, Cris, Pablo, Lorenzo, Stefano, y otros muchos que no nombro, por no parecer pesado y egocéntrico.

No quisiera dejar pasar la oportunidad de acordarme de los fantásticos técnicos del Laboratorio de Tecnología de Estructuras “Luis Agulló”. Merecen especial reconocimiento Camilo, Robert y Jordi, por prestarme la ayuda necesaria siempre que la necesitaba y hacerme las indicaciones técnicas oportunas durante los numerosos ensayos realizados. Por si esto fuera poco, su forma de ser me ha hecho mucho más fácil y agradable las largas temporadas que he pasado por el LTE. Por este mismo motivo, quiero reconocer la ayuda dada por Lucía y Sandro durante las campañas experimentales

Quisiera agradecer a la empresa ESCOFET 1886, S.A, por haber confiado en mí para formar parte del Plan Piloto de Doctorados Industriales.

Por último (y más importante), quiero dedicar esta Tesis a mis padres, Francisco y Meri, y a mi hermana Eli, por darme desde pequeño el cariño y la educación adecuada, con valores basados en el esfuerzo y la perseverancia. Sin ellos, me habría sido imposible poder acabar este documento.

Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras

Francisco Mena Sebastián

Departamento de Ingeniería de la Construcción – ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech

RESUMEN

A pesar del gran avance que ha supuesto la redacción del Anejo 15 de la Instrucción Española EHE-08 para la utilización de los hormigones con áridos reciclados en aplicaciones estructurales, esta reglamentación se limita únicamente a un porcentaje de sustitución del 20 % de la fracción gruesa, siempre y cuando los áridos procedan del machaqueo de hormigón, con un % de material cerámico inferior al 5 %, y una absorción de agua menor al 7 %.

En cambio, estudios recientes han demostrado que prácticamente la totalidad de los áridos reciclados producidos en España, incumplen dichas limitaciones, debido principalmente al elevado contenido de material cerámico (áridos reciclados mixtos), lo que a su vez, implica una mayor capacidad de absorción de agua. Este hecho provoca que apenas el 15-20 % de los residuos de construcción y demolición generados en España sean tratados convenientemente y revalorizados como material de construcción. Esta cifra es muy inferior al 70 % de reutilización impuesto a nivel europeo para el año 2020. Actualmente, los áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción y demolición son considerados como un material inferior, utilizados en aplicaciones de bajo valor añadido como material granular para el relleno de zanjas o subbases de carretera.

Para corregir esta situación, la Tesis Doctoral pretende demostrar la viabilidad de utilizar hormigones cuya fracción gruesa de su esqueleto granular esté compuesta al 100 % por árido reciclado mixto, en aplicaciones estructurales. Para ello, se plantea una extensa labor experimental, compuesta por dos campañas experimentales (una en la planta de hormigonado y otra a nivel de laboratorio), complementada con una prueba piloto.

Dicha prueba piloto, enmarcada en la construcción de un aparcamiento subterráneo en la C/Badajoz de Barcelona, consistió en la ejecución de seis pantallas de sostenimiento ejecutadas por bataches, fabricadas con otras tantas dosificaciones de hormigón con árido reciclado mixto. Además, dadas las habituales dificultades de puesta en obra que plantean este tipo de elementos, se decidió dotar a la mezcla de dos aspectos adicionales: la autocompactabilidad e incorporar fibras de acero.

Posteriormente, una vez avanzada la excavación, los elementos fueron retirados de la obra y fragmentados, con el objetivo de analizar aspectos relacionados con la puesta en obra y el comportamiento estructural. Concretamente, se obtuvieron un gran número de probetas-testigo con las que se analizaron las propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad de los hormigones, así como ensayos a flexión de elementos “a escala real”.

Adicionalmente, se llevó a cabo una experiencia en las instalaciones de la empresa ESCOFET 1886, S.A, a fin de verificar la viabilidad de introducir este tipo de hormigones en un proceso industrializado, y especialmente para la fabricación de elementos de mobiliario urbano. Los resultados obtenidos en ambas aplicaciones son satisfactorios, abriendo nuevas perspectivas más prometedoras a este tipo de hormigones.

Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras

Francisco Mena Sebastián

Departamento de Ingeniería de la Construcción – ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech

ABSTRACT

Despite the advance that has led the incorporation of Annex 15 in the Spanish EHE-08, the use of recycled aggregate concrete (RAC) is minimum in structural applications. This regulation limits the percentage of substitution to 20 % of the coarse fraction. Moreover, only the recycled concrete aggregates (RCA) with ceramic particle content less than 5 % and water absorption less than 7 % are accepted.

However, recent studies have shown that most of recycled aggregates produced in Spain exceeds these limitations, mainly due to the high content of ceramic material (mixed recycled aggregates), and absorption capacity water. This fact causes that only 15-20 % of construction and demolition waste (CDW) generated in Spain are treated and revalued as a construction material. This mark is below the goal (70 %) fixed in European regulations for year 2020. Currently, the recycled aggregates from CDW are considered as a waste material, only suitable in applications like filling-material in trenches or road subbase.

The main objective of the Doctoral Thesis is demonstrate the feasibility of RAC made with a 100 % of mixed recycled aggregates (MRA) in structural applications. To reach this goal, an extensive experimental campaign (in concrete factory, in UPC “Luis Agulló” Lab and a field test) was carried out.

This field test was part of the construction of an underground parking in C/Badajoz (Barcelona). Six diaphragm-walls were cast from as many doses of mixed RAC. In this experience, two properties were added to the concrete, self-compactability and fiber-reinforced. The aim of this decision was prevent the usual casting difficulties in these structural elements.

Three months later, the elements were removed and fragmented in order to obtain specimens. Physical, mechanical and durability properties of the concretes were analyzed, and 18 full-scale flexural slab tests were carried out.

Another experience was carried out in ESCOFET 1886, SA plant (Martorell), in order to verify the feasibility of this type of concrete in an industrial process. The results are satisfactory in both applications, opening new promising prospects for this type of concrete.

INDICE GENERAL

1. Introducción

1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	RAZÓN DE SER	5
1.3	OBJETIVOS	8
1.3.1	Objetivos generales.....	8
1.3.2	Objetivos específicos.....	8
1.4	METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	9

2. Estado del conocimiento

2.1	INTRODUCCIÓN	13
2.2	HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO.....	14
2.2.1	Tipo de áridos reciclados.....	14
2.2.2	Propiedades de los áridos reciclados mixtos.....	16
2.2.3	Gestión de los RCD en España. Marco normativo.....	18
2.2.4	Gestión de los RCD en Catalunya.....	22
2.3	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ÁRIDO RECICLADO MIXTO Y FIBRAS DE ACERO. FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA.....	23
2.3.1	Métodos de dosificación.....	24
2.3.2	Trabajabilidad.....	25
2.3.3	Puesta en obra.....	26
2.4	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ÁRIDO RECICLADO MIXTO Y FIBRAS DE ACERO. PROPIEDADES MECÁNICAS	26
2.4.1	Resistencia a compresión.....	27
2.4.2	Módulo de elasticidad.....	28
2.4.3	Resistencia a tracción.....	29
2.4.4	Retracción.....	30
2.4.5	Fluencia.....	31
2.4.6	Coefficiente de Poisson.....	32
2.5	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ÁRIDO RECICLADO MIXTO Y FIBRAS DE ACERO. DURABILIDAD	32
2.5.1	Penetración de cloruros.....	33
2.5.2	Expansión por sulfatos	33
2.5.3	Carbonatación.....	34
2.5.4	Resistencia a hielo-deshielo	34

2.5.5	Lixiviación.....	34
2.6	CONCLUSIONES.....	35
<u>3. Campañas experimentales</u>		
3.1	INTRODUCCIÓN.....	37
3.2	PLAN DE TRABAJO.....	39
3.3	MATERIALES EMPLEADOS.....	40
3.4	DOSIFICACIONES REALIZADAS.....	44
3.5	FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA.....	48
3.5.1	Campaña en planta (1ª campaña).....	48
3.5.2	Campaña en laboratorio (2ª campaña).....	52
3.5.3	Plan de ensayos: probetas moldeadas en 1ª y 2ª campaña.....	55
3.6	MEMORIA 3ª CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	60
3.6.1	Extracción de bataches.....	60
3.6.2	Plan de corte. Testigos y placas.....	61
3.6.3	Plan de ensayos: probetas-testigo extraídas de los bataches.....	65
3.6.4	Ensayo de losas.....	69
3.6.5	Post – ensayo.....	75
<u>4. Análisis de resultados: Testigos y probetas</u>		
4.1	INTRODUCCIÓN.....	77
4.2	INFLUENCIA DEL ÁRIDO RECICLADO MIXTO.....	79
4.2.1	Estado fresco: consistencia del hormigón.....	80
4.2.2	Estado endurecido: Propiedades físicas.....	81
4.2.3	Estado endurecido: Propiedades mecánicas.....	85
4.3	INFLUENCIA DE LAS FIBRAS DE ACERO.....	92
4.3.1	Estado fresco: consistencia del hormigón.....	93
4.3.2	Estado endurecido.....	94
4.4	INFLUENCIA DEL MÉTODO DE PRE-SATURACIÓN.....	96
4.5	INFLUENCIA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.....	98
4.6	DECANTACIÓN EN ALTURA.....	107
4.6.1	Peso específico – densidad = $f(z)$	108
4.6.2	Velocidad de ultrasonidos = $f(z)$	109
4.6.3	Resistencia a compresión = $f(z)$	111
4.6.4	Módulo de elasticidad = $f(z)$	112
4.6.5	Contenido de fibras – resistencia residual a flexión = $f(z)$	113
4.7	CONCLUSIONES.....	114

5. Análisis de resultados: Ensayo de losas

5.1	INTRODUCCIÓN	117
5.2	ESQUEMA DEL ENSAYO DE FLEXIÓN	118
5.3	RESPUESTA ESTRUCTURAL (R)	120
5.3.1	Propiedades físico-mecánicas de las losas.....	120
5.3.2	Geometría de las losas.....	124
5.3.3	Otras variables.....	129
5.4	SOLICITACIONES ACTUANTES	135
5.4.1	Carga de peso propio.....	137
5.4.2	Cuchillo de carga puntual.....	139
5.5	RESULTADOS OBTENIDOS	140
5.5.1	Comportamiento pre-fisuración (Carga de fisuración – carga máxima).....	140
5.5.2	Comportamiento post-fisuración (losas con refuerzo).....	149
5.6	CONCLUSIONES	155

6. Evaluación de la durabilidad del hormigón con árido reciclado y fibras

6.1	INTRODUCCIÓN	157
6.2	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN	159
6.3	ENSAYO DE EXPANSIÓN POR SULFATOS INTERNOS	163
6.4	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS	167
6.5	CONCLUSIONES	171

7. Aplicación industrial del hormigón con árido reciclado

7.1	INTRODUCCIÓN	173
7.2	IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL	174
7.2.1	Materiales empleados.....	174
7.2.2	Caracterización del árido reciclado.....	175
7.2.3	Dosificación.....	177
7.2.4	Proceso de amasado y puesta en molde.....	178
7.2.5	Resultados obtenidos.....	179
7.3	RECOMENDACIONES DE PROYECTO	180
7.3.1	Ámbito de aplicación.....	180
7.3.2	Modificación de formulaciones.....	180
7.4	RECOMENDACIONES RELATIVAS AL PROCESO DE FABRICACIÓN	182
7.5	RECOMENDACIONES RELATIVAS A PUESTA EN OBRA	183

7.6	CONCLUSIONES.....	184
<u>8. Conclusiones</u>		
8.1	INTRODUCCIÓN	185
8.2	CONCLUSIONES GENERALES	185
8.3	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	186
8.3.1	Proceso de fabricación del hormigón con árido reciclado y fibras	186
8.3.2	Puesta en obra del hormigón con árido reciclado y fibras	187
8.3.3	Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del material	188
8.3.4	Estudio de la durabilidad del material.....	189
8.3.5	Estudio del comportamiento estructural.....	189
8.3.6	Implementación de este tipo de hormigones en un proceso industrial.....	190
8.3.7	Propuestas de modificación del articulado de la Instrucción EHE-08.....	191
8.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	192

Referencias bibliográficas

ANEJO A: Fichas técnicas de los materiales. Campaña en planta UNILAND - LTE

ANEJO B: Caracterización y ensayos de probetas y testigos

ANEJO C: Caracterización y resultados experimentales del ensayo de las losas

ANEJO D: Registros y fotografías de los ensayos de durabilidad

ANEJO E: Fichas técnicas de los materiales. Experiencia en ESCOFET 1886, S.A

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Producción de áridos 2012, por país, procedencia y uso.....	2
Figura 1.2. Construcción sostenible. Ciclo de vida de los áridos	3
Figura 1.3. % de reutilización de los RCD en cada país. Elaboración propia	4
Figura 1.4. Representación del hormigón autocompactante con árido reciclado y fibras	7
Figura 1.5. Organismos e instrucciones nacionales.....	8
Figura 1.6. Organización de la Tesis Doctoral.....	10
Figura 1.7. Plan de Doctorados Industriales. Agentes actuantes.....	12
Figura 2.1. Artículos publicados en revistas científicas (Fuente: sciencedirect.com).....	13
Figura 2.2. Tipo de áridos reciclados. a) ARH, b) ARMh, c) ARMc, d) ARC.....	15
Figura 2.3. Relación entre el contenido de material cerámico con:.....	16
Figura 2.4. Relación entre el la absorción de agua y la densidad seca en estufa.....	17
Figura 2.5. a) Cinética de absorción de los áridos reciclados, b) Relación entre WA_{24h} y WA_{10m}	18
Figura 2.6. Evolución de la gestión de RCD a Catalunya. Periodo 2001 - 2013.....	22
Figura 2.7. Fracciones granulométricas (Hormigón autocompactante vs convencional).....	24
Figura 2.8. Comparativa entre el método NMA y el TSMA, propuesto por Tam et al. (2005).....	24
Figura 2.9. Influencia de las fibras en la extensión de flujo. a) de acero, b) de polipropileno.....	26
Figura 2.10. Evolución de resistencia a compresión en función de la relación a/c.....	27
Figura 2.11. Influencia del árido reciclado sobre el módulo de elasticidad.....	28
Figura 2.12. Influencia del % árido reciclado sobre la resistencia a tracción del hormigón.....	30
Figura 2.13. Influencia del % árido grueso reciclado sobre la retracción del hormigón.....	31
Figura 2.14. Influencia del % árido grueso reciclado sobre la fluencia del hormigón.....	32
Figura 3.1. Aspecto de los áridos reciclados, a) 4/12-T-R, b) 12/20-T-R.....	41
Figura 3.2. Curvas granulométricas de los áridos.....	42
Figura 3.3. Diagrama de decisión en planta	48
Figura 3.4. Pretratamiento sobre los áridos reciclados. a) Aditivo, b) Saturación con agua.....	49
Figura 3.5. Proceso de adición de fibras.....	50
Figura 3.6. HA-R12-20/35a. a) Adición fibras, b) Aspecto seco, c) Conos formados.....	50
Figura 3.7. a) Recorrido desde planta de hormigonado a obra, b) Detalle de la localización	51
Figura 3.8. Procedimiento constructivo:.....	52
Figura 3.9. Adición de materiales.....	54
Figura 3.10. a) Ensayo de extensión de flujo, b) Probetas moldeadas, c) Cámara húmeda LTE	55
Figura 3.11. a) Prensa Ibertest, b) Equipo para el pulido de testigos, c) Aspecto final	56
Figura 3.12. a) Ensayo de flexión; b) Configuración y c) Ciclos de carga del ensayo módulo E	57
Figura 3.13. Proceso de corte de las probetas cúbicas (esquema)	57
Figura 3.14. Determinación de la permeabilidad al agua bajo presión. a) Disposición general del ensayo, b) Corte diametral en seco (ensayo brasileño), c) Frente de penetración.....	59
Figura 3.15. Determinación del contenido y orientación de fibras mediante el método inductivo: a) Reset del sistema, b) medida del valor de ΔL en el eje 1.....	60
Figura 3.16. a) y b) Corte aplicado, c) Manipulación y transporte.....	60

Figura 3.17. Esquema de corte de los batache.....	61
Figura 3.18. Número y tipo de testigo extraídos (por batache).....	62
Figura 3.19. Obtención de los testigos prismáticos (TP).....	63
Figura 3.20. a) Cuadrícula TCY, b) Extracción TCZ, c) Extracción TCY, d) Testigos extraídos	63
Figura 3.21. Obtención de placas	64
Figura 3.22. a) Marcaje del batache, b) Traslado de las placas hasta el LTE (Batache 5).....	64
Figura 3.23. a) UNE 83515:2010 (adaptado), b) Probetas testigo ensayadas	66
Figura 3.24. a) Aplicación resina epoxy, b) Aspecto testigo, c) Configuración del ensayo.....	67
Figura 3.25. a) Carga diametral, b) Frente penetración, c) Imagen digitalizada.....	67
Figura 3.26. a) Inmersión de probetas en agua, b) Toma de lecturas con reloj comparador.....	68
Figura 3.27. a) Ensayo UNE-EN 14651:2007, b) Corte testigos, c) Método Inductivo	68
Figura 3.28. Acopio de losas (1ª Fase).....	69
Figura 3.29. a) Geometría Losa 2C, b) Barra de acero Ø16.....	70
Figura 3.30. Secuencia de la maniobra de volteo de la losa 5I.....	71
Figura 3.31. a) Carretilla elevadora, b) Viga de reparto y caballetes de apoyo, c) Neopreno	71
Figura 3.32. Disposición de los LDVT's sobre la superestructura	72
Figura 3.33. a) y b) Colocación de LVDTs, c) Detalle adhesivo X60.....	72
Figura 3.34. a) Mortero nivelante, b) Lecho de arena nivelante, c) Mortero apoyo - losa.....	73
Figura 3.35. Configuración del ensayo. Losa 4S (Luz: 1,90m).....	74
Figura 3.36. a) Velocidad de carga del ensayo, b) Diagrama Carga (kN) – tiempo (s).....	74
Figura 3.37. a) y b) Registro de fisuras; c) Acopio y d) retirada de losas ensayadas.....	75
Figura 4.1. Consistencia de los hormigones. Influencia del uso de árido reciclado	80
Figura 4.2. Campaña en planta. Relación densidad aparente – porosidad en función de:.....	83
Figura 4.3. Campaña en LTE. Evolución de la resistencia media a compresión (f_{cm}).....	86
Figura 4.4. Correlación entre el Módulo de elasticidad (E) y la resistencia a compresión (f_{cm}), según diferentes normativas internacionales. Propuestas existentes – Datos experimentales	88
Figura 4.5. Relación f_c –Módulo E. a) Probetas LTE, b) Testigos bataches	91
Figura 4.6. Obtención gráfica del parámetro f_{AR} . a) Probetas LTE, b) Testigos bataches. ...	91
Figura 4.7. Consistencia de los hormigones. Influencia de las fibras de acero.....	93
Figura 4.8. Influencia de las fibras de acero. a) Densidad- porosidad, b) Densidad – f_{c28} (Datos: probetas moldeadas en planta).....	94
Figura 4.9. Influencia de las fibras de acero. Evolución de la resistencia a compresión.....	95
Figura 4.10. Consistencia de los hormigones. Influencia del método de saturación utilizado	96
Figura 4.11. Resultados del Test de comportamiento del aditivo hidrófugo experimental... ..	97
Figura 4.12. Procedimiento constructivo Batache #1, a) Inicio, b) Fin	99
Figura 4.13. Ejecución del batache 3. Dinámica de flujo de los hormigones	100
Figura 4.14. Relación densidad – porosidad. a) Probetas moldeadas en planta, b) Testigos	100
Figura 4.15. Influencia del proceso constructivo. Resistencia a compresión = $f(t)$	102
Figura 4.16. Criterio de asignación de ejes. Nomenclatura	103
Figura 4.17. Orientación fibras. (Datos: Probetas moldeadas en planta y en LTE).	104
Figura 4.18. Orientación de fibras en bataches. (Datos: Testigos cúbicos 150 mm)	104
Figura 4.19. Influencia del tipo de fibra sobre el efecto pared.....	107
Figura 4.20. Decantación en altura. Peso específico = $f(z)$. a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF	108

Figura 4.21. Decantación en altura. Vel ultrasonidos= $f(z)$. a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF	110
Figura 4.22. Decantación en altura. Res. compresión = $f(z)$. a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF	111
Figura 4.23. Decantación en altura. Módulo $E = f(z)$. a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF..	112
Figura 4.24. Decantación en altura. Contenido de fibras = $f(z)$	113
Figura 5.1. Proceso de obtención de losas. Plan de corte	118
Figura 5.2. Esquema general del ensayo. Determinación de las variables principales.....	119
Figura 5.3. Peso específico = $f(z)$. Valores medios por batache.....	121
Figura 5.4. Módulo de elasticidad = $f(z)$. Valores medios por batache.....	121
Figura 5.5. Losa 3C. a) Composición de la losa, b) Diagrama P-w.....	123
Figura 5.6. Losa 2C. Rotura de la esquina. Voladizo lateral	125
Figura 5.7. Influencia del proceso de corte sobre el espesor de la losa (Vista perfil).....	126
Figura 5.8. Ejemplo de homogeneización geométrica de las losas.....	128
Figura 5.9. Grado de influencia de las barras $\varnothing 16$, en función de su trayectoria (Batache #3)	131
Figura 5.10. Influencia de las barras de acero sobre los resultados obtenidos	131
Figura 5.11. Consecuencias geométricas de los cortes oblicuos	132
Figura 5.12. Pendiente transversal de la losa 4S. Mortero de nivelación.....	132
Figura 5.13. Presencia de secciones débiles en las losas del batache #5 (fisura y coquera)	135
Figura 5.14. Cargas actuantes durante el ensayo. Diagramas de Momento flector.....	135
Figura 5.15. Elección de la sección crítica, en función de la fisura. a) Losa 1C, b) Losa 4S.	136
Figura 5.16. Ley de Momentos flectores debida al peso propio de la losa (M_{PP}).....	139
Figura 5.17. Influencia de la viga de reparto sobre la ley de M_f debida a la carga puntual	140
Figura 5.18. Influencia de la barra de acero en el proceso de corte. Superficie no adecuada	144
Figura 5.19. Desplazamientos verticales registrados en la losa 2C (hasta fisuración)	145
Figura 5.20. Losa 3S. a) Diagrama P-w, b) Diagrama desplazamiento vertical - z.....	146
Figura 5.21. Losa 3S. a) Diagrama P-w, b) Diagrama desplazamiento vertical - z.....	147
Figura 5.22. Influencia de la rugosidad transversal en la inercia I_x . a) Esquema, b) Losa 1S	148
Figura 5.23. Losas HRF. Comportamiento post-fisuración. a) Diagrama F-t, b) F-w.....	149
Figura 5.24. Diagrama F-w. Losas HRF a) 2S, b) 5S, c) 5C, d) 5I, e) 6C, f) Parámetro $\xi = f(w)$	150
Figura 5.25. Cálculo seccional del HRF, en estado fisurado.....	153
Figura 5.26. Cálculo seccional de la losa 3I, en estado fisurado	153
Figura 5.27. a) Diagrama P-w de la losa 3I, b) Composición de la sección crítica.....	154
Figura 6.1. Ensayos de durabilidad. Localización de las probetas ensayadas en los bataches	158
Figura 6.2. Frentes de penetración de agua bajo presión.....	159
Figura 6.3. Relación entre P_{MED} y P_{MAX} con: a) Contenido de árido reciclado, b) Porosidad	162
Figura 6.4. Relación entre porosidad abierta y total. a) Testigos TCZ, b) Testigos TCY	162
Figura 6.5. Expansiones medidas (en mm/m) por dosificación.....	165
Figura 6.6. Relación entre expansión máxima (mm/m) y contenido total de sulfatos (kg/m^3)	165
Figura 6.7. Tratamiento imágenes. A) original, b) Realce contraste, c) Evaluación del frente	168
Figura 6.8. Relación entre X_d (ensayo de penetración cloruros), con:.....	170

Figura 7.1 Curvas granulométricas de los áridos utilizados.....	175
Figura 7.2. Árido reciclado. a) Vista general, b) Detalle, c) Clasificación de componentes	176
Figura 7.3. a) Silos de áridos, b) Planta dosificadora, c) Aspecto del hormigón tras amasado	179
Figura 7.4. a) Molde metálico, b y c) Proceso de vertido del hormigón	179
Figura 7.5. Producto acabado. a) Vista general, b) Detalle.....	180

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición de los áridos reciclados en España (Fuente GERD, 2013).....	6
Tabla 1.2. Objetivos específicos	9
Tabla 2.1. Propiedades físicas exigidas a los áridos reciclados (Fuente: McNeil y Kang, 2013)	19
Tabla 2.2. Estimación de RCD generados en España (Fuente GERD, 2012).....	20
Tabla 2.3. Relaciones propuestas entre f_c y E en hormigones con árido reciclado.....	29
Tabla 2.4. Comparativa entre inmisión e inmisión máxima aceptable (en mg/m^2).....	34
Tabla 3.1. Innovaciones introducidas en las campañas experimentales	38
Tabla 3.2. Objetivos para cada campaña experimental.....	39
Tabla 3.3. Análisis químico del cemento CEM II/A-M (V-L) 42.5R.....	40
Tabla 3.4. Composición de los áridos reciclados (en %).....	42
Tabla 3.5. Propiedades físicas de los áridos reciclados.....	43
Tabla 3.6. Propiedades de las fibras.....	44
Tabla 3.7. Dosificaciones realizadas en la campaña en planta (1ª campaña).....	46
Tabla 3.8. Dosificaciones realizadas en la campaña en laboratorio (2ª campaña).....	47
Tabla 3.9. Humedad presente en los áridos reciclados.....	53
Tabla 3.10. Plan de ensayos a nivel probeta (Propiedades mecánicas).....	55
Tabla 3.11. Normas y metodologías seguidas	65
Tabla 3.12. Distancia entre apoyos	70
Tabla 3.13. Colocación de los LVDT's (distancia del LVDT correspondiente al apoyo A).....	72
Tabla 4.1. Correspondencia entre dosificaciones (campaña en planta) y bataches ejecutados	78
Tabla 4.2. Elementos ensayados – campañas experimentales.....	79
Tabla 4.3. Densidades de los materiales utilizados (en g/cm^3).....	82
Tabla 4.4. Volúmenes relativos de cada componente en la dosificación [-]	82
Tabla 4.5. Influencia del contenido de árido reciclado en la densidad.....	84
Tabla 4.6. Densidad del hormigón HRM en función del contenido, y tipo, de árido reciclado.....	85
Tabla 4.7. Influencia del contenido de árido reciclado sobre la reducción de f_{cm}	86
Tabla 4.8. Influencia del contenido (y tipo) de árido reciclado sobre la reducción de E.....	87
Tabla 4.9. $E = f(f_c)$. Diferencia entre valores teóricos y experimentales (en %).....	88
Tabla 4.10. Relación $f_c - E$. Análisis estadístico.	89
Tabla 4.11. Resistencia a flexotracción. Comparativa entre datos experimentales y teóricos	92
Tabla 4.12. Influencia de las fibras de acero. Composición de las dosificaciones utilizadas..	93
Tabla 4.13. Propiedades en estado endurecido. Influencia del método de saturación utilizado	98
Tabla 4.14. Resistencia a compresión. (Datos: Probetas moldeadas en planta).....	101
Tabla 4.15. Contenido de fibra en los bataches, según su localización (en kg/m^3).....	106
Tabla 4.16. % fibras orientadas verticalmente (eje 1) en los bataches, según su localización	106
Tabla 4.17. Influencia del efecto pared sobre la orientación de las fibras (Testigos cúbicos)	107

Tabla 4.18. Decantación en altura. Peso específico = $f(z)$. Datos estadísticos.....	109
Tabla 4.19. Decantación en altura. Vel ultrasonidos = $f(z)$. Datos estadísticos.....	110
Tabla 4.20. Resistencia a compresión = $f(z)$	112
Tabla 4.21. Módulo de elasticidad = $f(z)$	112
Tabla 4.22. Resistencia residual = $f(z)$. (Datos: Testigos prismáticos).....	114
Tabla 5.1. Variables de cálculo utilizadas en el análisis.....	120
Tabla 5.2. Resistencia a tracción. Valor medio (x), desviación estándar (σ) y número de muestras (n) ensayadas por batache. Datos en MPa.....	122
Tabla 5.3. Resistencia residual a flexión. Valor medio (x), desv. estándar (σ). Datos en MPa.....	123
Tabla 5.4. Replanteo de las losas. Canto $h = f(z)$. Datos en cm.....	124
Tabla 5.5. Valor medio (h) y dispersión (σ) del espesor de las losas. Datos en cm.....	127
Tabla 5.6. Cálculo de espesores y anchos equivalentes.....	129
Tabla 5.7. Refuerzo existente en cada losa. Fibras y/o barra de acero.....	130
Tabla 5.8. Inercia seccional (I_x) de las losas analizadas.....	134
Tabla 5.9. Secciones críticas.....	136
Tabla 5.10. Carga de peso propio (Q_{PP}), entre apoyos, de cada losa.....	137
Tabla 5.11. Carga de peso propio (q_{PP}), en el voladizo de las losas del batache #2.....	138
Tabla 5.12. Cargas críticas teórica (F_{CR}) y experimental (F_{EXP}) de las losas "C".....	142
Tabla 5.13. Estudio de sensibilidad. Resistencia a flexión. Parámetro Φ	143
Tabla 5.14. Cargas críticas teórica (F_{CR}) y experimental (F_{EXP}) de las losas "S" e "I".....	146
Tabla 5.15. Cargas críticas teórica (F_{CR}) y experimental (F_{EXP}) para la losa 5I (b eficaz real).....	148
Tabla 5.16. a) Testigos cúbicos 150 mm; b) Testigos cilíndricos 90 x 90 mm.....	151
Tabla 5.17. Resistencias residuales, f_{Ri} , de las losas de HRF.....	152
Tabla 5.18. Resistencias residuales (f_{Ri}) obtenidas del ensayo de losas.....	153
Tabla 5.19. Losa 3I. $\sigma = f(w)$ en el hormigón y en la barra de acero.....	154
Tabla 6.1. Ensayos de durabilidad realizados.....	158
Tabla 6.2. Resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión.....	160
Tabla 6.3. Influencia del contenido de yeso sobre las expansiones registradas.....	164
Tabla 6.4. Valor de la constante k de entumecimiento, según dosificación.....	167
Tabla 6.5. Frentes de penetración (X_d) obtenidos para los tiempos de exposición de: 62 días (T_{62}), 95 días (T_{95}) y 205 días (T_{205}).....	168
Tabla 6.6. Coeficientes de difusión D (m^2/s), en función de la dosificación y cota del batache.....	171
Tabla 7.1. Propiedades físicas del árido reciclado 6/12-T-R.....	176
Tabla 7.2. Densidad estimada del árido reciclado 6/12-T-R, a partir de su composición....	177
Tabla 7.3. Dosificación utilizada durante la prueba.....	177

LISTA DE SÍMBOLOS

α :	Parámetro que relaciona la sección de fisura con la sección centro luz de la losa
$\tilde{\alpha}_{AR}$:	Factor reductor. Relación $f_c - E$
α_E :	Coefficiente f_c -E. Norma Brasileira
β :	Factor de ajuste agua de saturación de áridos reciclados
β_{cc} :	Coefficiente de evolución de la resistencia a compresión en el tiempo
γ :	Expansión lineal por entumecimiento del hormigón
γ_c :	Coefficiente de seguridad del hormigón
$\delta_{MÁX}$:	Flecha máxima
$\delta(z)$:	Desplazamiento vertical en función de la cota z
ϵ :	Deformación del hormigón
ϵ_c :	Deformación del hormigón
ϵ_s :	Deformación del acero
λ :	Relación de aspecto de las fibras
ν :	Coefficiente de Poisson
ξ :	Parámetro que relaciona F_{CR} y F_{EXP}
ρ :	Densidad del hormigón
ρ_{AR} :	Densidad del árido reciclado
ρ_a :	Densidad aparente del hormigón
ρ_i :	Densidad del material "i"
ρ_m :	Densidad media
ρ_r :	Densidad real del hormigón
σ_{INF} :	Tensión en la fibra inferior de la sección
σ_c :	Tensión de compresión
ω :	Humedad del árido
ϕ :	Parámetro estadístico adimensional
\emptyset_{EXT} :	Diámetro de extensión de flujo
\emptyset_f :	Diámetro de las fibras
ΔL :	Incremento de inductancia
b :	Anchura de la losa
b_e :	Anchura eficaz de la losa
b_{EQ} :	Anchura de losa equivalente

c_i :	% del componente "i" en el árido reciclado
d :	Distancia de la barra $\emptyset 16$ a la fibra superior de la sección
d' :	Distancia de la barra $\emptyset 16$ a la fibra inferior de la sección
d_n :	Anchura del neopreno
erf :	Función de error
$\hat{\epsilon}$:	Deformación máxima en el ensayo de expansiones por sulfatos
f :	Carga distribuida debido a la carga F
f_c :	Resistencia a compresión del hormigón
f_{ck} :	Resistencia característica a compresión del hormigón
f_{cm} :	Resistencia media a compresión del hormigón
f_{ct} :	Resistencia a tracción del hormigón
$f_{R,i}$:	Resistencia residual
\bar{h} :	Espesor medio de la losa
h_c :	Espesor de losas "C"
h_i :	Espesor de losas "I"
h_m :	Grosor de la capa de mortero nivelante
h_j :	Espesor de la sección "j" de la losa
h_l :	Espesor de la losa, en la superficie lateral lisa
h_r :	Espesor de la losa, en la superficie lateral rugosa
h_s :	Espesor de losas "S"
h_{EQ} :	Espesor de losa equivalente
h_1 :	Espesor máximo de la losa en sección de rotura
h_2 :	Espesor mínimo de la losa en sección de rotura
$h_{m,l}$:	Espesor de la capa de mortero en la superficie lateral lisa
$h_{m,r}$:	Espesor de la capa de mortero en la superficie lateral rugosa
i :	Pendiente de la losa en sentido transversal
k :	Constante de entumecimiento del hormigón
l_f :	Longitud de las fibras
l_{vi} :	Longitud del voladizo de la losa "i"
m_{inm} :	masa de la probeta en inmersión
m_{seco} :	masa de la probeta tras secado en estufa
m_{sss} :	masa de la probeta en estado saturado superficie seca
n :	número de muestras
n_c :	Relación entre E_s/E_c
p :	Porosidad

s:	Coefficiente de evolución de la resistencia a compresión en función del cemento
t:	Tiempo
v_p :	Velocidad de onda longitudinal
y_{CDG} :	Distancia del CDG de la sección a la fibra inferior
w:	Abertura de fisura
w/c:	Relación agua/cemento
z:	Cota o profundidad en el batache
z_{CL} :	Cota z de la sección centro luz
z_{CR} :	Cota z de la sección crítica
A_B :	Área de la losa, en planta
A_H :	Área de la losa, en perfil
A_P :	Área de penetración de agua en el ensayo de penetración de agua bajo presión
C:	Fuerza en el bloque de compresión de la sección
C_f :	Contenido de fibras
C_i :	Concentración inicial de cloruros en el hormigón
C_s :	Concentración de cloruros en superficie
D:	Coefficiente de difusión
D_e :	Coefficiente efectivo de difusión
E_c :	Módulo de elasticidad del hormigón
E_d :	Módulo de elasticidad dinámico
E_m :	Módulo de elasticidad medio
E_s :	Módulo de deformación del acero
F:	Fuerza
F_i :	Fuerza aplicada por el pistón
F_{CR} :	Carga de fisuración teórica de la losa
F_{EXP} :	Carga de fisuración experimental de la losa
F_{LOP} :	Límite de proporcionalidad
H:	Grosor del batache
I_x :	Inercia seccional de la losa, según eje X.
K_{Cb} :	Parámetro de Langmuir
K_{RCA} :	Coefficiente corrector de fluencia
L:	Longitud del batache
L_i :	Luz del ensayo de la losa "i"
M_{CR} :	Momento máximo de la sección crítica
M_F :	Momento debido al cuchillo de carga F

M_{PP} :	Momento debido al peso propio de la losa
M_S :	Momento total actuante
M_w :	Momento asociado a la abertura de fisura w
P_m :	Porosidad másica
P_{nat} :	Peso del árido reciclado en estado natural
P_{seco} :	Peso del árido reciclado en estado seco
P_v :	Porosidad abierta
$P_{MÁX}$:	Penetración máxima de agua en el ensayo de penetración de agua bajo presión
P_{MED} :	Penetración media de agua en el ensayo de penetración de agua bajo presión
Q_{PP} :	Carga de peso propio
R_u :	Valor de la respuesta estructural
S_u :	Valor de las solicitaciones
T :	Tensión en la barra $\emptyset 16$
V_i :	Volumen relativo del material "i" respecto el total del hormigón
WA_{10m} :	Absorción de agua a los 10 minutos
WA_{24h} :	Absorción de agua a las 24 horas
X :	Profundidad de la fibra neutra
X_d :	Profundidad de penetración de cloruros

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Ante el difícil periodo que está atravesando la construcción en los últimos años, es necesario innovar y evolucionar con el objetivo de superar la crisis con mejores perspectivas de futuro. La percepción que la sociedad tiene del sector es bastante negativa, especialmente en aspectos relacionados a la sensibilidad medioambiental. Según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2009), se estima que un 16 % del total de los gases de efecto invernadero emitidos en España se generan en actividades asociadas a la construcción, tales como la producción de cemento (que supone el 5 % de las emisiones mundiales de CO₂) o el transporte de materias primas.

Una forma de promover una construcción más sostenible y minimizar su impacto sobre el medio ambiente es aplicar el concepto denominado “triple R”: reducir - reutilizar - reciclar. En este sentido, ya se han adoptado estrategias para reducir el CO₂ emitido a la atmósfera, a través de medidas como disminuir el porcentaje de clínker en el cemento, sustituyéndolo parcialmente por adiciones como cenizas volantes, escorias de alto horno, humo de sílice o puzolanas, entre otras. Con esta actuación puede reducirse hasta en un 60 % el CO₂ producido (desde 1,0 a 0,4 ton. CO₂/ton. cemento)

Una de las consecuencias que ha provocado la crisis, es la fuerte reducción en la demanda de áridos. A nivel europeo, según datos del año 2012 proporcionados por la *Union Européenne des Producteurs de Granulats (UEPG)*, la producción de áridos se sitúa en

2700 millones de toneladas, lo que supone un descenso de un 28 % desde los máximos alcanzados en el año 2007, y un volumen de negocio cercano a los 15000 millones de €.

En la Figura 1.1 se presenta la producción de áridos de los países asociados a la UEPG correspondiente al año 2012. Los datos se clasifican en función del país y su procedencia, así como el uso posterior que se da al árido. Los países con mayor producción son: Rusia (576 millones de ton.), Alemania (564 millones de ton.) y Turquía (431 millones de ton.). Por su parte, España ocupa el octavo puesto, con una producción de 113 millones de toneladas, lo que supone un descenso de hasta el 80 % respecto los niveles máximos del año 2007. En términos relativos, España ocupa el lugar trigésimo segundo, con una producción de 2,4 toneladas/hab·año, lejos de las 16 toneladas/hab·año de países como Finlandia o Noruega.

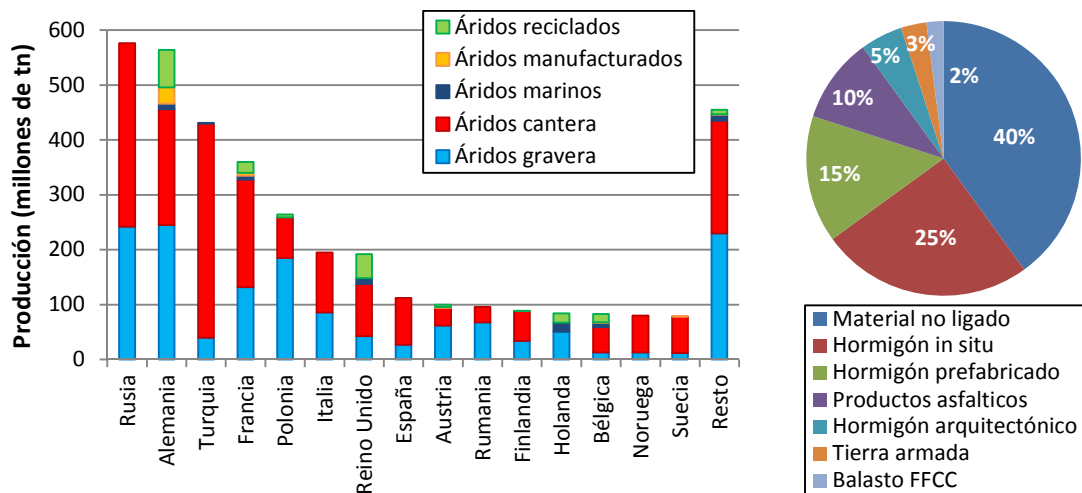


Figura 1.1. Producción de áridos 2012, por país, procedencia y uso
(Fuente: UEPG. Elaboración propia)

El uso que mayoritariamente se da a los áridos se reparte entre aplicaciones no ligadas, que suponen el 40 % del total; la fabricación del hormigones, ya sea *in situ* (25 %); prefabricados (15 %); o arquitectónicos (5 %); y otros usos minoritarios como productos asfálticos, tierra armada o de balasto en líneas de ferrocarril.

La procedencia de esos 2700 millones de toneladas anuales se reparte de la siguiente forma. Más del 90 % son áridos naturales extraídos de canteras y graveras (53 y 39 %, respectivamente). Este tipo de explotaciones provocan un impacto ecológico y social negativo. Además, la mayor parte de los áridos obtenidos de este modo se transportan por carretera hasta su destino, produciendo unas emisiones medias de 160 gr CO₂/ton·km. Teniendo en cuenta el enorme volumen de áridos producidos, ello supone una cantidad de CO₂ considerable.

En cambio, únicamente un 5 % de la producción (135 millones de toneladas) son áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción y demolición (en adelante,

RCD). Los mayores productores de áridos reciclados son Alemania, Reino Unido, Francia, Holanda y Bélgica, con 68, 40, 20, 17 y 15 millones de toneladas, respectivamente. Estos RCD proceden fundamentalmente de dos fuentes: (1) los escombros producidos por la demolición de una estructura; y (2) los rechazos de la industria del prefabricado.

Para transformar un residuo (RCD) en un producto (árido reciclado), debe realizarse el proceso de valorización que se esquematiza en la Figura 1.2.



Figura 1.2. Construcción sostenible. Ciclo de vida de los áridos

En primer lugar, se realiza una selección manual, a fin de separar aquellos residuos que no pueden ser tratados en la planta de reciclaje como plásticos, maderas u otros contaminantes de grandes dimensiones. Posteriormente, el material se introduce en una criba rotatoria, que la separa en dos fracciones granulométricas: 0-10 mm y superior a 10 mm. A continuación, se extraen los materiales férricos y de baja densidad por medio de un separador magnético y un soplante, respectivamente. Finalmente, se alimenta el triturador y se clasifica el árido mediante cribado en las fracciones correspondientes.

Los principales beneficios que se consiguen con la reutilización de los RCD, tal y como señala Behera *et al.* (2014) son: una conservación de los recursos naturales, reduciendo la demanda de áridos vírgenes; una reducción del consumo de energía, asociados tanto al proceso de obtención de áridos como de transporte; y dar solución al actual problema con el vertido incontrolado de residuos, preservando el medio ambiente.

Se calcula que en España se generan anualmente entre 0,5 y 1,0 toneladas de RCD por habitante (GERD, 2013). De ellos, más del 80 % de los RCD producidos se depositan en vertederos. Además, debido al vacío legal existente en algunas regiones, la gestión de estos

residuos en muy deficiente, estimándose que hasta un 50 % de los residuos generados se vierten de forma ilegal, sin realizar previamente ningún tipo de tratamiento. Esta práctica conlleva una serie de riesgos, tanto para la sociedad como para el medio ambiente, como puede ser la contaminación de acuíferos o del terreno adyacente.

En la Figura 1.3 se muestran los porcentajes de reutilización de los RCD en 18 países europeos. Para completar la información, los datos se comparan con el objetivo marcado por la Directiva Europea 2008/98/CE para el año 2020. A simple vista, podemos apreciar la gran disparidad entre los países analizados. En el lado positivo, destacan Dinamarca, Holanda, Alemania, Estonia o Irlanda, con porcentajes superiores al 80 %, cumpliendo actualmente con el objetivo del 70 % para el año 2020. En el otro extremo, se sitúan países mediterráneos como España, Italia, Chipre y Grecia, donde apenas se reutilizan un 15 % de los RCD generados.

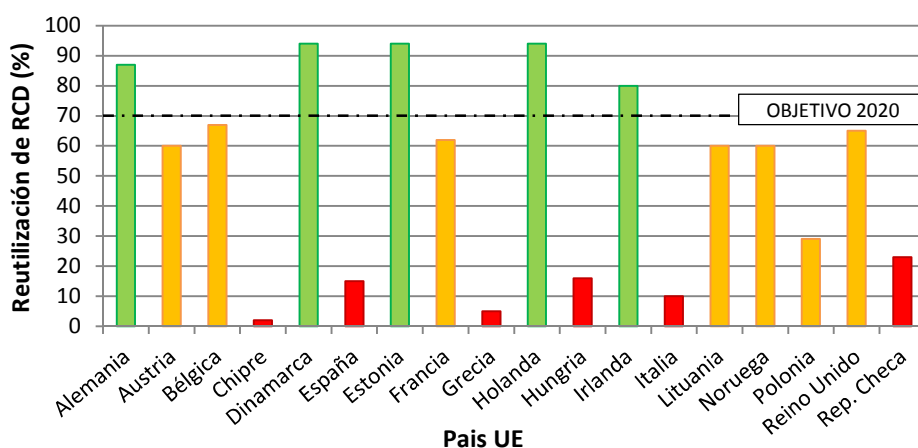


Figura 1.3. % de reutilización de los RCD en cada país. Elaboración propia

El bajo porcentaje de utilización de los RCD en España se debe a varios motivos. Por un lado, debido a cuestiones geográficas, los áridos naturales son abundantes y de gran calidad. En cambio, la mayoría de los áridos reciclados presentan elevados contenidos de contaminantes, como cerámica, yeso o vidrio, a causa de la histórica utilización de estos materiales en construcción civil, y concretamente, en edificación.

Otras causas que pueden provocar las diferencias mostradas en la Figura 1.3, son aspectos culturales de las sociedades, tales como la conciencia y valoración social del medio ambiente (muy arraigados en los países del norte de Europa), y por otro, a la legislación vigente en cada estado. Actualmente, debido a limitaciones en el marco normativo español, los áridos reciclados mixtos se emplean principalmente en aplicaciones no estructurales, como relleno de zanjas o subbases de carreteras (Park, 2003; Jiménez *et al.*, 2011; Agrela *et al.*, 2012; Herrador *et al.*, 2012). Si bien estas alternativas reutilizan parte de los RCD generados, no revalorizan completamente el producto obtenido. Por tanto, aún queda margen de mejora.

Desde el punto de vista económico, si bien intervienen muchas variables en el análisis (Khalaf *et al.*, 2004), la utilización de áridos reciclados puede resultar una alternativa viable a los naturales, dependiendo del peso específico dado a cada criterio (Henry *et al.*, 2011; Tosic *et al.*, 2015). A fechas actuales, y a pesar de la disminución de entre el 25 y el 40 % del precio de los áridos naturales por la menor demanda de éstos debido a la crisis económica, las tarifas para los áridos reciclados siguen siendo inferiores a la de los naturales. Mientras que la tarifa para las arenas y gravas naturales oscila entre los 5 y los 12 €/tonelada, el coste de los áridos reciclados puede oscilar entre los 2,5 y los 5 €/tonelada, dependiendo de la granulometría y la materia prima de la cual procedan (origen pétreo, cerámico, etc.).

Además, el hecho que las plantas de tratamiento y revalorización de RCD se concentren, mayoritariamente, en las proximidades de las grandes ciudades, puede incentivar el uso de los hormigones con áridos reciclados en entornos urbanos, debido a la gran disponibilidad de recursos, y a los menores costes de transporte en comparación con los áridos naturales.

1.2 RAZÓN DE SER

La utilización de áridos reciclados para la fabricación de materiales, tales como hormigones y mezclas asfálticas, ha sido una de las alternativas planteadas para dar solución a los problemas expuestos en el apartado anterior. De este modo, se consigue reducir la extracción de áridos naturales, y dar salida a los RCD generados. Sin embargo, hoy en día, los áridos reciclados plantean una serie de dudas sobre el comportamiento mecánico y la durabilidad del hormigón fabricado ellos. Consecuentemente, su elección como material en proyectos de ingeniería civil es mínima.

Actualmente, la utilización de áridos reciclados viene limitada por las recomendaciones establecidas en las diferentes normativas nacionales y organismos internacionales. En España, el uso con fines estructurales de áridos reciclados viene dado por el Anejo 15 de la instrucción EHE-08: "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados". En él, se limita a un **porcentaje máximo de sustitución del 20 % de la fracción gruesa**, siempre y cuando el árido se haya obtenido a partir del **machaqueo de hormigón**, y su **absorción de agua sea inferior al 7 %**. Este criterio es idéntico al establecido en Reino Unido u Holanda.

En cambio, otros países europeos son más flexibles, permitiendo porcentajes de sustitución superiores. Por ejemplo, en Alemania se sitúa entre el 25 y el 45 %, dependiendo del tipo de árido y ambiente de exposición al cual estará sometido el hormigón, mientras que en Bélgica o Dinamarca se permite hasta un 100 %. En estos dos últimos países, incluso se va un paso más allá, permitiendo con restricciones el uso de árido reciclado fino.

En cuanto a su composición, los contaminantes en el árido reciclado, tales como el material cerámico, material bituminoso, yeso o materia orgánica, no pueden superar los valores dados en la Tabla 1.1. Según un estudio publicado en la Guía Española de Áridos Reciclados (GERD, 2013), estos límites son superados ampliamente, sobretudo el relacionado con el contenido de material cerámico.

Elemento	Valor medio	Rango (min-máx)	Máximo contenido de impurezas (en % peso)
Áridos no ligados	25,98	0,19 - 73,00	-
Materiales de hormigón	45,86	12,00 - 91,39	-
Material cerámico	22,00	0,00 - 70,00	< 5
Asfalto	3,51	0,00 - 44,21	< 1
Otros (plástico, vidrio, etc.)	1,95	0,00 - 14,50	< 1

Tabla 1.1. Composición de los áridos reciclados en España (Fuente GERD, 2013)

Casi la totalidad de los **áridos reciclados** producidos en España son **mixtos** (ARM), compuestos por proporciones variables de hormigón triturado, piedra sin mortero adherido, materiales cerámicos y de obra de fábrica, asfalto y otros materiales de origen pétreo. Por tanto, aplicando las restricciones impuestas en la EHE-08, la utilización de estos materiales queda restringida a unos casos muy puntuales, y hace imposible su introducción como material de construcción de forma generalizada.

Sin embargo, la EHE-08 contempla que, en caso de emplear un porcentaje de sustitución superior al 20 % establecido, debe certificarse su aptitud en base a la realización de estudios específicos y experimentación complementaria. Aprovechando esta última puntualización, la Tesis Doctoral pretende demostrar la viabilidad de sustituir hasta el 100 % de la fracción gruesa, por áridos reciclados mixtos en usos estructurales. De este modo, se pretende reducir la brecha existente actual entre los áridos reciclados calificados como aptos y los disponibles.

Una de las posibles aplicaciones más viables para los hormigones con árido reciclado mixto son las cimentaciones o elementos de mobiliario urbano. En ambos casos, los requerimientos relativos a resistencias no son tan exigentes como en otras tipologías estructurales, siendo el hormigón tipo HA-25 el más frecuentemente utilizado.

Además, en cimentaciones resulta fundamental garantizar una buena ejecución, dado que la inspección y reparación de estas estructuras resulta muy dificultosa o imposible, y los efectos que conlleva su colapso pueden resultar fatales. Además, las patologías relacionadas con las cimentaciones son costosas económicamente, y traen asociada una gran repercusión social (necesidad de desalojo de viviendas). Para prevenir este tipo de contratiempos, se cree conveniente introducir en el hormigón con árido reciclado dos aspectos adicionales: **autocompactabilidad y reforzado con fibras de acero**, tal y como se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Representación del hormigón autocompactante con árido reciclado y fibras

Utilizar un hormigón autocompactante en cimentaciones conlleva una serie de beneficios: (1) minimiza los riesgos habituales durante la ejecución de pilotes y pantallas, como la formación de discontinuidades o coqueras; y (2) reduce los plazos de ejecución, así como los ruidos y vibraciones en el trabajo, dado que se eliminan las tareas de compactación.

A su vez, las fibras de acero pueden resultar competitivas en estructuras sometidas a fenómenos de fatiga, impactos, o bien, en aquellas estructuras donde el refuerzo venga condicionada por razones termohigrométricas y/o la colocación de la jaula de armado sea especialmente compleja, como en los elementos en contacto directo con el terreno. Algunos ejemplos recientes ponen de manifiesto su viabilidad elementos estructurales como pavimentos portuarios, viarios, industriales o aeroportuarios, losas (Pujadas *et al.*, 2014), dovelas (de la Fuente *et al.*, 2012a), tuberías (de la Fuente *et al.*, 2012b) o en pantallas y pilotes construidos *in situ* (Ramos, 2012).

Desde principios del siglo XX, se ha estudiado la posibilidad de introducir fibras (de acero u otros materiales) dentro de la masa de hormigón. De este modo se dota al material de una mayor resistencia a la tracción una vez la matriz ha fisurado. Sin embargo, su elevado coste hacía inviable su utilización. Este escenario ha cambiado en los últimos años; por un lado, se ha producido un incremento del coste de la mano de obra en los países desarrollados, y por otro, el gran avance tecnológico experimentado en el sector de la construcción, y concretamente en el conocimiento del hormigón reforzado con fibras (HRF). Ello ha permitido que la adición de fibras de acero pueda resultar competitiva económicamente respecto a las soluciones basadas en la colocación de armaduras.

A diferencia de lo que sucede con el hormigón en masa, el HRF puede mantener una cierta resistencia residual. Ésta depende de dos parámetros básicos: el contenido de fibra (C_f) y la relación de aspecto de las mismas (λ), definida por el cociente entre la longitud (l_f) y el diámetro de las fibras (ϕ_f) (Barros *et al.*, 2005).

Hasta hace pocos años, la falta de una normativa específica ha limitado la utilización de fibras de acero a fines no estructurales, tales como el control de la fisuración producida por la retracción y/o fluencia del hormigón, efectos térmicos, agentes medioambientales, entre otros. Esta situación ha sido subsanada con las publicaciones de

la Recomendación Final de la RILEM TC 162-TDF (Vanderwalle *et al.*, 2003), el Model Code (FIB, 2010) o instrucciones nacionales como la alemana DBV Merkblatt Stahlfaserbeton (DBV, 2001), la italiana CNR-DT 204 (CNR, 2006) y del Anejo 14 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (CPH, 2008).



Figura 1.5. Organismos e instrucciones nacionales

Con el marco normativo actual se han asentado las bases de cálculo para poder analizar seccionalmente el comportamiento del HRFA. Por último, estudios llevados a cabo más recientemente, como los realizados por Blanco (2013) o Pujadas (2013), han aportado herramientas para la caracterización y diseño de elementos de HRF, ya sean fibras de acero o plásticas, respectivamente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos generales

En base a lo expuesto en el apartado anterior, los objetivos de la Tesis Doctoral son los siguientes:

- **Validar el uso estructural de los hormigones fabricados con un 100 % de la fracción gruesa por árido reciclado mixto**, para lo cual, se realiza una profunda campaña experimental que comprende desde la fabricación y puesta en obra de los hormigones; ensayos mecánicos (tanto a nivel probeta, como del elemento estructural a escala real), y completada con ensayos relativos a la durabilidad.
- **Incidencia de la sustitución de los áridos naturales por reciclados sobre un proceso industrializado**, valorando las principales ventajas e inconvenientes que ello conlleva, tanto en elementos hormigonados *in situ* como en prefabricados. Todo ello puede servir de base para una propuesta de transferencia tecnológica a entornos profesionales.

1.3.2 Objetivos específicos

En la Tabla 1.2 se detallan los objetivos específicos a alcanzar en cada uno de los temas que serán analizados.

Tema	Objetivo específico
Fabricación y puesta en obra de hormigones autocompactantes con árido reciclado y fibras	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer un sistema de fabricación adecuado para este tipo de hormigones. • Evaluar los diferentes métodos de pre-saturación de los áridos reciclados. • Analizar la incidencia de los áridos reciclados sobre la consistencia del hormigón en estado fresco. • Analizar la incidencia de las fibras de acero sobre la consistencia del hormigón en estado fresco. • Detectar y corregir posibles incidencias debido a la utilización de áridos reciclados mixtos
Estudio del comportamiento mecánico del material	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar la influencia del árido reciclado mixto sobre las propiedades físicas del material. • Determinar la influencia del árido reciclado mixto sobre las propiedades mecánicas del material • Proponer nuevas formulaciones adaptadas a este tipo de hormigones • Analizar el comportamiento de un elemento estructural “a escala real”
Estudio de la durabilidad del material	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar la influencia del árido reciclado mixto sobre la durabilidad. • Determinar la influencia de las fibras de acero sobre la durabilidad. • Analizar la influencia del método de pre-saturación de los áridos reciclados sobre la durabilidad.
Análisis del elemento estructural fabricado con el material	<ul style="list-style-type: none"> • Validar la posibilidad de utilizar el hormigón con árido reciclado en elementos estructurales. • Detectar <i>a posteriori</i> incidencias durante la puesta en obra (segregación de áridos reciclados y/o fibras) • Analizar la influencia de la puesta en obra sobre las propiedades del material
Viabilidad de su implantación en un proceso industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la viabilidad de utilizar este tipo de hormigones en un proceso industrializado • Proponer una serie de recomendaciones a nivel de proyecto, fabricación y puesta en obra, para el hormigón estudiado • Realizar una serie de modificaciones en el articulado del Anejo 15 de la EHE-08.

Tabla 1.2. *Objetivos específicos*

1.4 METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En la Figura 1.6, se presenta la organización seguida en la Tesis Doctoral. Cada uno de los grandes temas planteados en el apartado de objetivos, se aborda en un bloque o capítulo individual, excepto el análisis de resultados. Debido al elevado número de ensayos realizados, esta parte queda dividida entre los capítulos 4, 5 y 6.

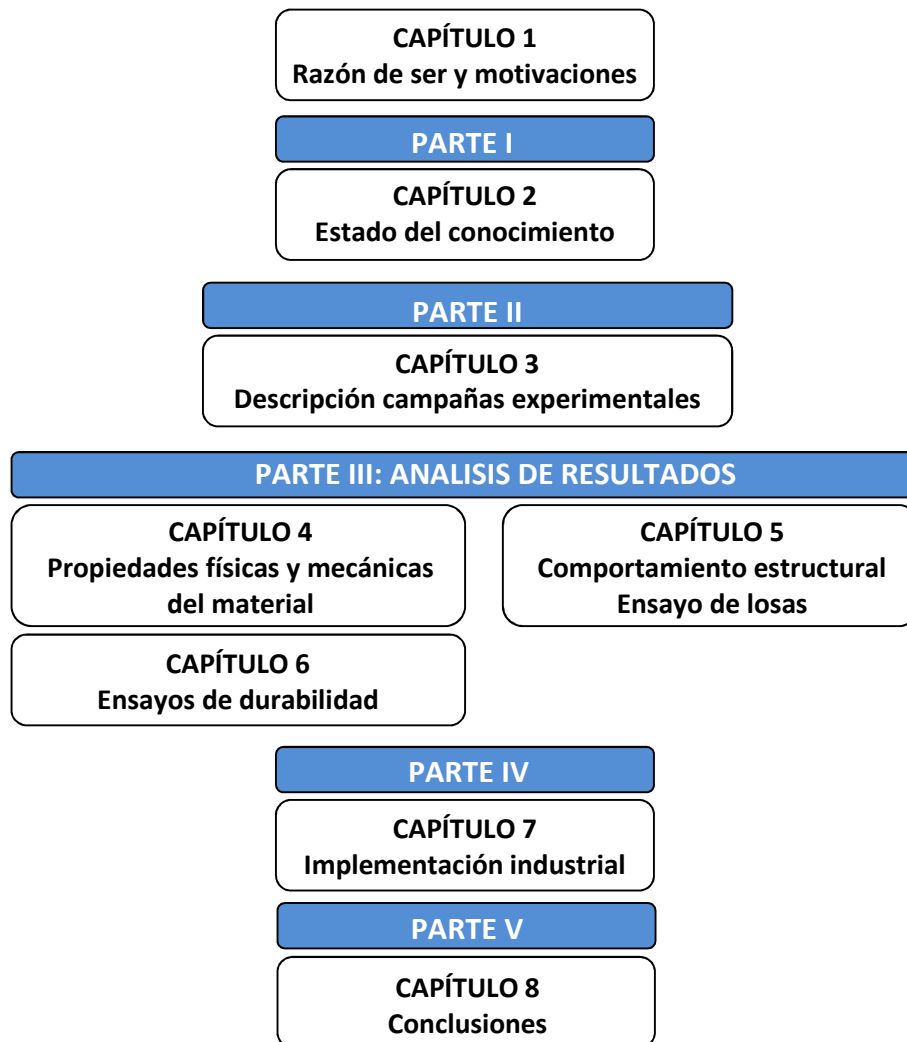


Figura 1.6. Organización de la Tesis Doctoral

La Tesis Doctoral se inicia con el presente capítulo de introducción, donde se expone la razón de ser, los objetivos (generales y particulares), así como la metodología seguida.

En la PARTE I (Capítulo 2) se presenta el estado del conocimiento. En él, se presenta la situación actual relativa a la utilización de áridos reciclados y las tipologías más habituales. También se expone el marco normativo relativo a su uso, tanto a nivel español (a través del Anejo 15 de la Instrucción de Hormigón estructural EHE-08), como internacional. El capítulo se completa con una revisión bibliográfica de estudios previos realizados que abordan la influencia que ejercen los áridos reciclados sobre las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón fabricado con éstos.

En la PARTE II (Capítulo 3), se describen las campañas experimentales realizadas, con el objetivo de verificar posteriormente mediante el ensayo de probetas moldeadas y

testigos, la viabilidad técnica del material. Para ello se han llevado a cabo dos campañas experimentales: una en la planta de hormigonado de la empresa UNILAND S.L y otra en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras “Luis Agulló” de la UPC.

En dichas campañas se realizaron 6-7 dosificaciones: una dosificación patrón y cinco dosificaciones de hormigón con árido reciclado, de las que dos de ellas incorporaban fibras de acero. Para completar el estudio, se realizó una prueba piloto, que ha consistido en la ejecución de seis bataches de sostenimiento con los hormigones fabricados durante la campaña en planta. Esta prueba, se enmarcaba dentro de las obras de construcción de un aparcamiento subterráneo por parte de la empresa *FCC Construcción S.A.*

En la PARTE III se realiza el análisis de los diferentes elementos ensayados. En primer lugar, en el Capítulo 4, se incluyen los resultados obtenidos de las probetas moldeadas durante las dos campañas experimentales, así como de las probetas-testigo que fueron extraídas de los bataches ejecutados durante la prueba piloto, una vez éstos fueron retirados de la obra. El número total de muestras evaluadas durante esta parte del estudio supera el millar. El análisis se ha centrado en determinar la influencia que ejerce el uso de áridos reciclados, de las fibras de acero y del método de fabricación, sobre las propiedades en estado fresco (consistencia) y endurecido (físicas y mecánicas) del material.

Una vez analizados las propiedades del hormigón a nivel probeta, en el Capítulo 5 se realiza el análisis del elemento estructural a escala real. Dada la imposibilidad de reproducir (con el equipamiento actual del laboratorio LTE de la UPC) las condiciones de contorno reales, tales como ensayar el batache integro, el empuje de tierras y restricciones de movimiento, etc, se decidió simplificar el ensayo.

Para ello, se realizó el despiece de los seis bataches ejecutados durante la prueba piloto, obteniendo un total de 18 losas (tres por batache) de dimensiones 2,5 x 1,7 x 0,2 metros, aproximadamente. La configuración del ensayo es el de una viga-losa biapoyada en sus extremos, sometida a un cuchillo de carga aplicada sobre la sección centro luz. Con esta configuración se pretende evaluar el comportamiento estructural de un elemento muro-pantalla sometido a las cargas habituales en este tipo de estructuras.

Para completar el análisis del material, en el Capítulo 6 se evalúa la durabilidad del mismo en ambientes de exposición habituales en elementos en contacto directo con el terreno, como las cimentaciones. En estos casos, el hormigón suele ser atacado por iones presentes en el terreno o por el nivel freático. Para ello, se realizan tres ensayos: profundidad de penetración de agua bajo presión, expansión por reacción sulfática interna y ensayo de penetración de cloruros.

En la PARTE IV (Capítulo 7) se comprueba la viabilidad de introducir el hormigón autocompactante con árido reciclado en un proceso industrializado, concretamente con la fabricación de un elemento prefabricado de mobiliario urbano. El capítulo se completa con una serie de recomendaciones a nivel de proyecto, fabricación y puesta en obra,

adquiridos en el desarrollo de la Tesis Doctoral. Por último, en el Capítulo 8, se exponen las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación

Para finalizar, debe remarcarse que la presente Tesis Doctoral se enmarca dentro de la Prueba Piloto de Doctorados Industriales, promovido por la Generalitat de Catalunya, y realizado bajo el amparo de la empresa **ESCOFET 1886, S.A**, y en colaboración con la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Este tipo de doctorados pretende favorecer la transferencia de conocimiento alcanzado en el entorno universitario y darle un valor añadido, transfiriéndolo al mundo empresarial.



Figura 1.7. Plan de Doctorados Industriales. Agentes actuantes

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

El empleo de áridos reciclados o fibras de acero en la fabricación de hormigones estructurales es relativamente novedoso. Si bien existen experiencias desde hace décadas, no ha sido hasta los últimos 10 o 15 años cuando se ha producido un interés por su utilización. En la literatura técnica son abundantes los estudios que abordan el tema por separado. Sin embargo, faltan experiencias que integren ambos materiales de forma conjunta. En la Figura 2.1 se presenta la evolución del número de artículos científicos publicados en los últimos 20 años (periodo 1996 – 2015) relacionados con **hormigones con árido reciclado (HAR)** y **hormigones reforzados con fibras (HRF)**.

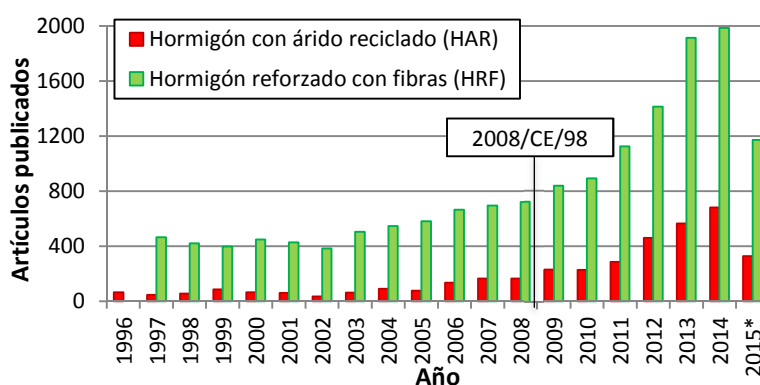


Figura 2.1. Artículos publicados en revistas científicas (Fuente: sciencedirect.com)

El principal motivo del aumento en el estudio del HAR en los últimos 5-10 años puede responder a una mayor sensibilidad medioambiental de las instituciones. Ello se ha visto plasmado a través de la aprobación de directivas y decretos legislativos, que pretenden incentivar el uso de los áridos reciclados. Concretamente, en el artículo 11.2b de la Directiva 2008/98/CE del parlamento Europeo se establece el objetivo de reutilización de residuos de construcción y demolición del 70 % para el año 2020.

El **objetivo** del presente capítulo es situar el conocimiento previo disponible, dentro del marco en que se encuadra la presente tesis doctoral: el uso de hormigones autocompactantes con áridos reciclados mixtos y fibras de acero, con misión estructural, principalmente en elementos en contacto directo con el terreno como cimentaciones. Cabe recordar que la instrucción española EHE-08 sólo admite, para hormigones estructurales, una sustitución del 20% del árido grueso procedente del machaqueo de residuos de hormigón. En esta tesis, tal como se ha expuesto en el capítulo 1, se plantea una sustitución del 100% del árido grueso de tipo mixto, con un contenido de material cerámico superior al 5 % permitido actualmente.

Bajo estas condiciones, se ha considerado oportuno describir el estado del conocimiento incidiendo en los aspectos más relacionados con el objetivo de la tesis. Debe aclararse que se hace más énfasis en la parte relacionada con los hormigones con áridos reciclados, dado que el número de trabajos es menor, y porque tanto la temática del HRF como de los hormigones autocompactantes (HAC) ya ha sido abordada en otros documentos del grupo investigador que soporta la tesis doctoral (dos Santos, 2010; de la Fuente, 2011; Pujadas, 2013; Blanco, 2013)

El capítulo se estructura de la siguiente forma: (1) se realiza una breve introducción sobre los áridos reciclados, de donde proceden, las tipologías existentes y sus diferencias más notables respecto a los áridos naturales, tales como una menor densidad y una mayor capacidad de absorción de agua; (2) se expone el marco normativo actual que regula el uso de los hormigones con árido reciclado, tanto a nivel nacional como internacional; (3) se hace una revisión de los resultados obtenidos en estudios y experiencias previas realizados hasta la fecha por otros autores. Con ello se pretende analizar la influencia que ejerce la sustitución parcial o total de árido reciclado y/o la utilización de fibras, sobre la fabricación, puesta en obra, las propiedades mecánicas y la durabilidad de un hormigón fabricado con estos componentes.

2.2 HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO

2.2.1 Tipo de áridos reciclados

Los residuos de construcción y demolición (RCD), proceden fundamentalmente de dos fuentes: (1) los escombros producidos de la demolición de una estructura; y (2) los

rechazos de la industria del prefabricado que no han superado el control de calidad exigido. En función de su origen, la composición y calidad de los áridos reciclados puede variar significativamente. Por ejemplo, la calidad los áridos reciclados obtenidos de los rechazos de la industria del prefabricado suele ser muy superior a la de los áridos reciclados que proceden de escombros, y similar a la de los áridos naturales (Pérez-Benedicto *et al.*, 2010; Soares *et al.*, 2014), debido a que proceden de hormigones con elevadas prestaciones.

Además, el proceso de valorización resulta fundamental para reducir la variabilidad del árido reciclado (Angulo *et al.*, 2010). En este sentido, algunos autores como Guneyisi *et al.* (2014) o Pepe *et al.* (2014), proponen realizar un tratamiento de limpieza superficial sobre los áridos reciclados, a fin de extraer gran parte del mortero adherido, y por ende, reducir su capacidad de absorción de agua, especialmente en caso de querer obtener hormigones de consistencia autocompactante.

Los componentes más habituales en los áridos reciclados son: el mortero de hormigón, el árido limpio (sin mortero adherido), material cerámico, material bituminoso, vidrio y otras impurezas como papel, madera o yeso. Dependiendo de la proporción de cada uno de ellos, la Guía Española de áridos reciclados (GERD, 2012), propone catalogarlos en cuatro tipologías:

- **Árido reciclado de hormigón (ARH):** cuando la suma del contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) sea superior al 90% en peso (Figura 2.2a).
- **Árido reciclado mixto de hormigón (ARMh):** cuando la suma del contenido de hormigón y piedra natural sea inferior al 90%, mientras que el material cerámico no alcance un 30% (Figura 2.2b).
- **Árido reciclado mixto cerámico (ARMc):** cuando el contenido de material cerámico esté comprendido entre el 30 y el 70% (Figura 2.2c).
- **Árido reciclado cerámico (ARC):** cuando el contenido de material cerámico supere el 70% del total. (Figura 2.2d)



Figura 2.2. Tipo de áridos reciclados. a) ARH, b) ARMh, c) ARMc, d) ARC

2.2.2 Propiedades de los áridos reciclados mixtos

Las propiedades de los áridos reciclados son diferentes a las que presentan los naturales. En caso que los áridos reciclados sean mixtos o cerámicos, estas diferencias se acentúan. La caracterización de un árido reciclado suele centrarse en tres aspectos: su composición, su densidad y su absorción de agua. Las propiedades (tanto en estado fresco como endurecido) del hormigón que se fabrique con áridos reciclados, vienen condicionados por las características de éstos.

En la Figura 2.3 se muestra la influencia que ejerce el contenido de material cerámico sobre la capacidad de absorción de agua (Figura 2.3a) y la resistencia a la fragmentación, determinada mediante el Coeficiente Los Ángeles (Figura 2.3b), de los áridos reciclados. Los datos corresponden al estudio realizado por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco (IHOBE, 2011) a partir del análisis de áridos reciclados producidos en varias plantas de revalorización españolas. En dichas figuras, la información se completa con las limitaciones actuales establecidas por la instrucción española EHE-08 para estos parámetros.

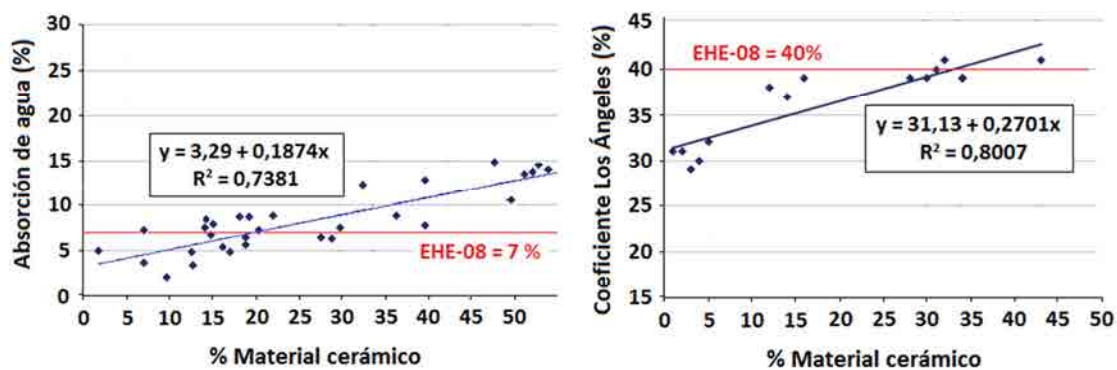


Figura 2.3. Relación entre el contenido de material cerámico con:
a) Absorción de agua (%), b) Coeficiente Los Ángeles (%) (Fuente IHOBE, 2011)

En ambos casos se detecta una relación lineal creciente entre el contenido de material cerámico y el aumento de la absorción de agua y del coeficiente de desgaste Los Ángeles. Este comportamiento se debe a la mayor porosidad y fragilidad del material cerámico respecto a la piedra natural.

Un 92 % de las muestras analizadas satisfacen el requisito impuesto de resistencia a la fragmentación (Figura 2.3b). Por el contrario, más del 60 % de los áridos superan el límite de absorción impuesto en la EHE-08 (7 %). Esta propiedad afecta en gran medida a la trabajabilidad del hormigón en estado fresco, por lo que si se aborda de forma adecuada (Klein, 2012), por ejemplo con una pre-saturación previa, pueden obtenerse buenos resultados, tanto de trabajabilidad como de prestaciones mecánicas.

Hay que pensar que los áridos reciclados de tipo cerámico, u otros que tengan una alta absorción, pueden tratarse de forma similar a un árido ligero de arcilla expandida (con valores de absorción de hasta el 30 %). En este tipo de hormigones, el contenido de árido ligero en la fracción gruesa (no en los finos), es elevado, pudiendo llegar al 100%. En consecuencia, no parece lógico imponer una limitación tan restrictiva sobre el parámetro de absorción del árido.

En la Figura 2.4 se muestra la relación entre la capacidad de absorción de agua (a las 24 horas), en relación con la densidad seca de las partículas. Por un lado, en la Figura 2.4a, los datos se clasifican según el tipo de árido: natural (NA); reciclado de hormigón (ARH); mixto (ARM) o cerámico (ARC). En cambio, en la Figura 2.4b, los mismos resultados se clasifican en función de su granulometría: fina o gruesa.

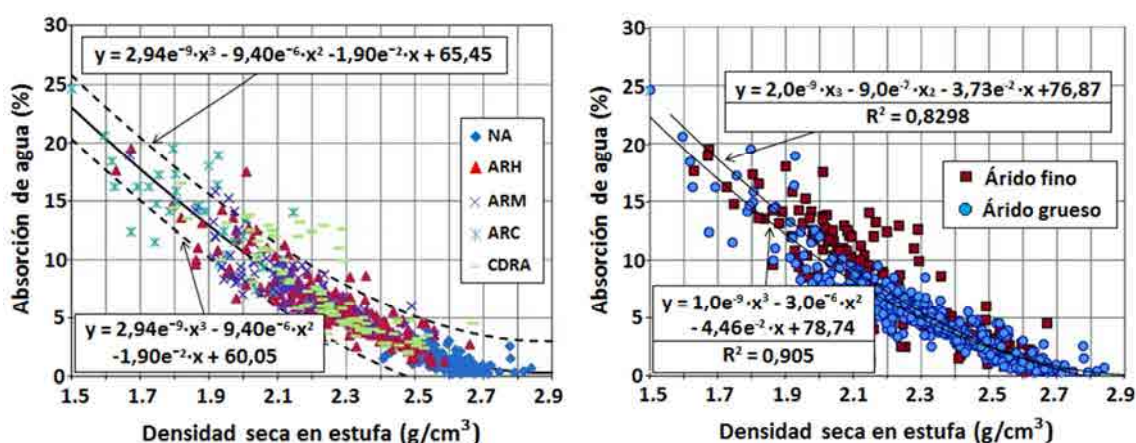


Figura 2.4. Relación entre la absorción de agua y la densidad seca en estufa. a) según tipo de árido reciclado, b) según granulometría del árido (Fuente: Silva et al., 2014)

Ambos parámetros están fuertemente relacionados. Cuanto menor sea la densidad seca del árido, mayor será la capacidad de absorción de agua. La densidad del árido oscila entre los 1,5 y los 2,9 g/cm³ y viene determinada por su composición, concretamente, del contenido de material cerámico. El rango típico de los áridos NA se sitúa entre los 2,5 y los 2,9 g/cm³, entre 2,0 y 2,5 g/cm³ para los ARH, entre 2,0 y 2,2 g/cm³ para los ARM, y entre 1,5 y 2,0 g/cm³ para los ARC.

La granulometría del árido reciclado también influye sobre sus propiedades físicas. Tal y como se aprecia en la Figura 2.5b, a igualdad de densidad seca, la absorción de agua de un árido fino puede llegar a ser de hasta un 5 % superior a la que presenta un árido grueso, debido a la mayor superficie específica de los áridos finos.

Otro aspecto a considerar de los áridos reciclados que influye en el proceso de amasado de un hormigón fabricado con éstos, es la cinética de absorción de agua. En la Figura 2.5a se realiza una comparativa del fenómeno entre áridos naturales y reciclados. Estudios previos (Djerbi Tegguer, 2012; García et al., 2014) han demostrado que, a

diferencia de los áridos naturales donde la absorción es rápida y poco significativa (del orden del 0,5 - 1 %), en áridos reciclados se prolonga hasta más allá de las 24 horas, pudiendo finalizar una vez transcurridas entre 96- 120 horas.

Este comportamiento se puede simular mediante una función que reproduce el fenómeno en distintas circunstancias del origen del árido (Klein *et al.*, 2014). La absorción registrada a las 24 horas únicamente representa entre el 60 y el 70 % de su capacidad máxima (Figura 2.5a). A su vez, la absorción de agua durante los primeros 5 - 10 minutos representa entre el 75 y el 85 % de la absorción a las 24 horas (Figura 2.5b).

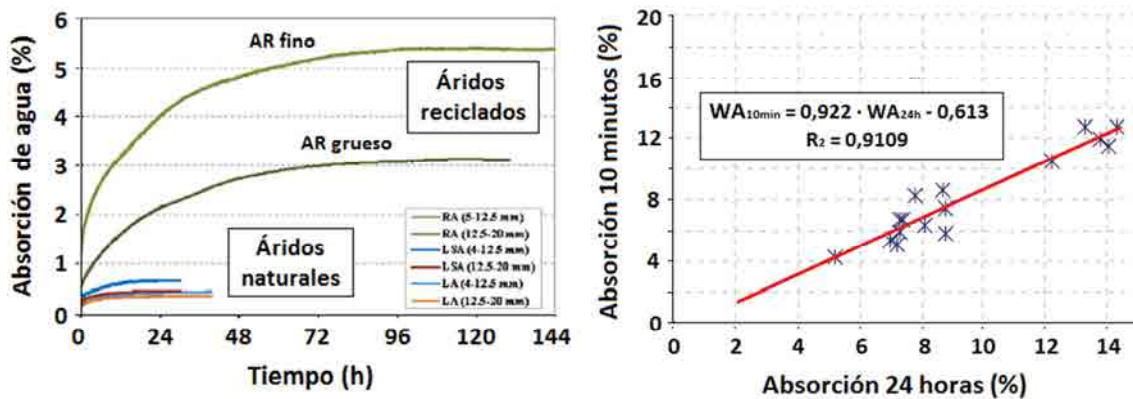


Figura 2.5. a) Cinética de absorción de los áridos reciclados, b) Relación entre WA_{24h} y WA_{10m}

2.2.3 Gestión de los RCD en España. Marco normativo

El marco normativo que regula la utilización de áridos reciclados es muy variado dependiendo del país. En la Tabla 2.1, se recogen el valor mínimo de densidad y absorción máxima, exigidos para poder emplear este tipo de áridos.

En España, el uso **con fines estructurales** de áridos reciclados se limita a un porcentaje máximo de sustitución del 20 % de la fracción gruesa, siempre y cuando el árido cumpla con las exigencias establecidas en el Anejo 15 de la instrucción EHE-08 (CPH, 2008). Este criterio es idéntico al establecido en Reino Unido u Holanda. En cambio, otros países europeos son más flexibles, permitiendo porcentajes de sustitución superiores.

Por ejemplo, en Alemania se sitúa entre el 25 y el 45 %, dependiendo del tipo de árido y ambiente de exposición al cual estará sometido el hormigón, mientras que en Bélgica o Dinamarca se permite hasta un 100 %. En estos dos últimos países, incluso se va un paso más allá, permitiendo con restricciones el uso de árido reciclado fino (McNeil y Kang, 2013).

País	Tipo de árido reciclado	Densidad seca (kg/m ³)	Absorción (%)
Australia	Clase 1A: Árido reciclado de hormigón con un % cerámica < 0,5	≥ 2,1	≤ 6
	Clase 1B: Árido reciclado mixto con un % cerámica < 30	≥ 1,8	≤ 8
Alemania	Tipo 1: gravilla de hormigón + arena	≥ 2,0	≤ 10
	Tipo 2: gravilla de construcción + arena	≥ 2,0	≤ 15
	Tipo 3: gravilla de albañilería + arena	≥ 1,8	≤ 20
	Tipo 4: gravilla mixta + arena	≥ 1,5	Sin límite
Hong-Kong	-	≥ 2,0	≤ 10
Japón	Árido grueso. Hormigones de $f_c < 45$ MPa	≥ 2,5	≤ 3
	Árido fino. Hormigones de $f_c < 45$ MPa	≥ 2,5	≤ 3,5
	Árido grueso. Hormigones no sujetos a secado, ni ciclos de hielo-deshielo	≥ 2,3	≤ 5
	Árido fino. Hormigones no sujetos a secado, ni ciclos de hielo-deshielo	≥ 2,2	≤ 7
	Árido grueso. Hormigón para relleno	Sin límite	≤ 7
	Árido fino. Hormigón para relleno	Sin límite	≤ 13
Corea	Árido grueso	≥ 2,5	≤ 3
	Árido fino	≥ 2,2	≤ 5
RILEM	Tipo 1: Árido cerámico	≥ 1,5	≤ 20
	Tipo 2: Árido machaqueo hormigón	≥ 2,0	≤ 10
	Tipo 3: Árido mezcla de natural (80 %) y reciclado (20 %)	≥ 2,5	≤ 5
España	Árido reciclado de hormigón	-	≤ 7

Tabla 2.1. Propiedades físicas exigidas a los áridos reciclados (Fuente: McNeil y Kang, 2013)

La aprobación de leyes que incentiven la reutilización de los RCD, puede favorecer a incrementar su atractivo respecto la alternativa de depositarlos en un vertedero. Como ejemplo de lo comentado, en los siguientes puntos se detallan algunos aspectos particulares de la legislación española:

- En España, el gravamen aplicado por depositar residuos de RCD sin tratamiento previo es de 3 €/tonelada (artículo 24 de la Ley 8/2008, de 10 de julio), mientras que en Dinamarca, donde el porcentaje de reutilización es superior al 90 % (Figura 1.3), el coste asciende hasta los 50 €/tonelada.
- Debido a su extensión geográfica, los recursos naturales existentes en España son abundantes y de buena calidad, lo que repercute en un bajo coste económico. En cambio, países como Dinamarca, Suecia o Gran Bretaña, aplica tasas sobre la extracción de áridos naturales

Actualmente, el control de los RCD en España recae sobre las comunidades autónomas, y en última instancia, en los ayuntamientos. Los mecanismos de control vienen definidos por las exigencias dadas por el Real Decreto RD 105/2008 del 1 de febrero. Sin embargo, únicamente 8 de las 17 CCAA (Aragón, Cantabria, Castilla y León, Cataluña, Extremadura, Comunidad de Madrid, Navarra y País Vasco) han realizado la trasposición de la información recogida en dicho decreto a la legislación autonómica.

Este vacío legal favorece que la gestión de los RCD en España sea muy deficiente, estimándose que hasta un 50 % de los residuos generados son tratados de forma ilegal (GERD, 2012). En la Tabla 2.2 se presentan los datos de producción de los RCD en España durante el periodo 2008-2011, clasificados según CCAA.

CCAA	Habitantes	Producción RCD (toneladas/año)			
		2008	2009	2010	2011
Andalucía	8.370.975	-	2.644.125	3.159.626	1.680.470
Aragón	1.347.095	1.986.112	272.048	502.491	380.245
Asturias	1.084.341	338.692	378.401	372.401	324.979
Islas Baleares	1.106.049	870.655	738.703	548.130	416.248
Canarias	2.118.549	-	-	-	294.886
Cantabria	592.250	144.410	100.523	83.379	122.018
Castilla y León	2.559.515	-	-	-	-
Castilla - La Mancha	2.098.373	666.143	891.980	789.954	772.260
Cataluña	7.512.381	7.408.785	4.714.237	3.527.020	3.200.000
Comunidad Valenciana	5.111.706	1.768.817	2.396.304	2.327.161	-
Extremadura	1.107.220	68.499	175.891	111.820	29.717
Galicia	2.797.653	490.932	628.863	546.797	-
Comunidad de Madrid	6.458.684	3.300.573	2.706.045	2.790.573	2.677.506
Región de Murcia	1.461.979	1.281.088	426.944	214.614	-
Com. Foral. Navarra	636.924	462.595	360.642	307.696	195.702
País Vasco	2.178.339	1.782.251	1.380.082	-	-
La Rioja	322.415	162.903	202.902	268.240	221.764
Total	46.864.418	20.732.455	18.017.690	15.549.902	10.315.794
Ratio (ton·hab/año)	-	0,61	0,43	0,39	0,29
% Prod. ILEGAL	-	35%	40 %	45 %	50 %
Producción estimada España (ton/año)	-	38.789.403	28.021.933	26.411.409	20.195.413

Tabla 2.2. Estimación de RCD generados en España (Fuente GERD, 2012)

La crisis económica ha tenido un gran impacto sobre la producción de RCD en España. Durante el periodo 2008-2011, el descenso acumulado alcanzó el 48 %. Únicamente, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana y La Rioja, han incrementado el volumen de RCD en un 15,9; 31,6 y 36,1 %, respectivamente. Por su parte, Cataluña, a pesar de continuar siendo la comunidad que más volumen de RCD gestiona, ha sido una de las comunidades donde más intenso ha sido el retroceso, reduciéndose en un 56 %. Otro de los datos a considerar es el elevado porcentaje de RCD que se tratan de forma ilegal, estimándose en un 50 % en el año 2011.

Con la aprobación de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (CPH, 2008), complementada con los Anejos 13 y 15, se ha dado el primer paso a nivel nacional para una construcción más sostenible, fomentando el uso de áridos reciclados en la producción de hormigones. Sin embargo, esta regulación se circunscribe únicamente al uso de áridos reciclados procedentes del machaqueo de hormigón (ARH), con más de un 90% de hormigón triturado y piedra natural sin mortero, un material que apenas representa el 15% de la producción total en España.

Tal y como se ha expuesto en la Tabla 1.1, aproximadamente un 70% del árido reciclado producido en España está compuesto por árido no ligado y mortero adherido. Aun así, la cantidad de impurezas presentes en los áridos analizados supera ampliamente los límites exigidos por la Instrucción EHE-08. Un claro ejemplo de lo comentado, es el contenido de material cerámico: mientras que el valor medio de éste en las muestras analizadas se encuentra en un 22%, el valor máximo permitido actualmente es de apenas un 5%, lo que reduce notablemente el volumen de RCD, calificados como aptos para ser utilizados como material de construcción.

En esta misma línea, la caracterización de áridos reciclados realizados por Martín-Morales *et al.* (2011), corroboró que éstos satisfacían los requisitos de granulometría, resistencia a fragmentación y de forma. Sin embargo, se incumplían requisitos relacionados con las propiedades físicas de los áridos, como la absorción (debido al elevado contenido de material cerámico), y el contenido de cloruros y/o sulfatos. Para corregir esta situación, propone varias posibles actuaciones como la mejora del sistema de clasificación de los áridos, sumergirlos en agua, o mezclarlos con áridos naturales

A partir de la composición habitual de áridos producidos en España, y en vista de los resultados obtenidos en su estudio, la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco (IHOBE, 2011), propone realizar las siguientes modificaciones en las especificaciones impuestas en la EHE-08:

- Absorción de agua máxima: 12 % (valor actual = 7 %)
- Contenido de asfalto máximo: 5 % (valor actual = 1 %)
- Contenido máximo de material cerámico: quitar restricción (valor actual = 5 %)

2.2.4 Gestión de los RCD en Catalunya

Tal y como se ha detallado anteriormente en la Tabla 2.2, Cataluña es la comunidad autónoma donde se genera un mayor volumen de RCD, alcanzando el 31 % del total de España en el año 2011 (GERD, 2013). Afortunadamente, es una de las 8 CCAA que cuenta con una legislación propia en materia de tratamiento de los RCD, regulada según los siguientes decretos:

- Decreto 89/2010, de 29 de junio, por el que se aprueba el Programa de gestión de residuos de la construcción de Cataluña (PROGROC), se regula la producción y gestión de los RCD, y el canon sobre la deposición controlada de éstos.
- Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos. Modificada por la Ley 9/2011

Según datos del año 2011 (AGR, 2011), Catalunya cuenta con 47 instalaciones de revalorización (39 plantas de reciclaje y 8 de triaje) y 53 depósitos de vertido. La localización de las plantas de revalorización se concentra en las proximidades de las grandes ciudades como Barcelona, Girona, Lleida, Terrassa, Manresa o Granollers.

En la Figura 2.6 se muestra la evolución de los RCD tratados en las instalaciones operativas en Catalunya durante el periodo 2001 – 2013, según el informe anual realizado por la *Agència Catalana de Residus* (ACG, 2013). En la gráfica, se hace una distinción entre el volumen de RCD que han sido vertidos a depósito (barra roja), y los que han sido procesados en una planta de revalorización (barra verde).

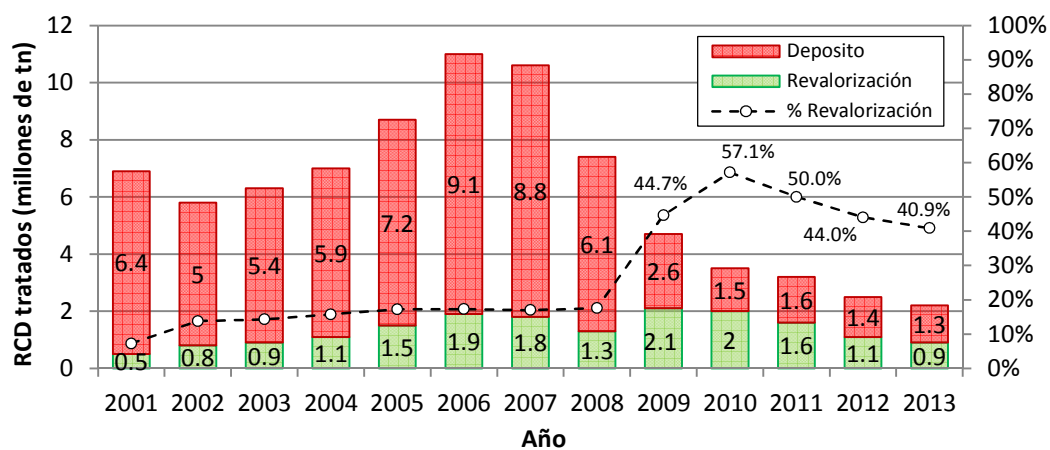


Figura 2.6. Evolución de la gestión de RCD a Catalunya. Periodo 2001 - 2013
(Fuente: *Agència Catalana de Residus*). Elaboración propia

Los datos confirman el impacto que la crisis económica ha provocado sobre el sector de la construcción, manifestándose con una fuerte contracción del volumen total de RCD generados en Catalunya. En términos relativos, la reducción acumulada en el año 2013

desde el máximo alcanzado en el año 2006, cuando se generaron 11 millones de toneladas, supera el 80 %.

En el lado positivo, se aprecia el efecto beneficioso que ha tenido la regulación normativa aprobada durante los años 2008 y 2009. Durante los años previos a esta legislación, el % de RCD revalorizados se situaba entre el 14,0 y el 17,2 % del total, lejos del objetivo impuesto a nivel europeo del 70 % para el año 2020; mientras que, a partir del año 2009, se produce un cambio de tendencia muy acentuado, aumentando el porcentaje de RCD tratados hasta un máximo en el año 2010 (57,1 %).

Esta tendencia favorable ha cambiado en los años posteriores, disminuyendo el porcentaje de RCD revalorizados, aunque manteniéndose por encima de los valores previos a la legislación de los citados años. Ello puede responder a que al corresponder a un periodo de crisis económica profunda, con un total de RCD pequeña, los porcentajes pueden sufrir mayores variaciones. En cualquier caso, parece conveniente seguir trabajando en esta dirección (cambios legislativos), a fin de poder incrementar el porcentaje de reutilización de los RCD.

2.3 HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ÁRIDO RECICLADO MIXTO Y FIBRAS DE ACERO. FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA.

Se define como hormigón autocompactante aquel que es capaz de compactarse únicamente con la acción de su propio peso. Dicho hormigón fue desarrollado por Okamura durante la segunda mitad de la década de los 80's en Japón, en un periodo donde la falta de trabajadores cualificados había repercutido en la durabilidad de las estructuras. Con este hormigón se garantiza una mayor durabilidad, independientemente de la habilidad del operario.

La fabricación de un hormigón autocompactante requiere realizar una serie de modificaciones sobre el esqueleto granular (Okamura y Ouchi, 2003). En este sentido, Skarendahl y Petersson (2000) recomiendan incrementar el contenido de finos (partículas inferiores a 0,125 mm), hasta el rango comprendido entre los 450 y los 600 kg/m³, y disminuir el volumen de árido grueso desde el 40-45 % al 30-34 % del volumen total de hormigón. Con estas modificaciones, representadas gráficamente en la Figura 2.7, se consigue reducir la fricción interna debida al contacto entre partículas, y consecuentemente, disponer de una mayor energía para el flujo de la mezcla.

Otro aspecto a considerar durante el proceso de fabricación de un hormigón autocompactante es la absorción de los áridos (Matias *et al.*, 2013). Los áridos naturales tienen una capacidad de absorción de agua mínima, de entre el 0,5 y el 1 %, por lo que se supone que toda el agua aportada se encarga de hidratar el cemento. En cambio, la absorción de agua en áridos reciclados puede alcanzar valores de hasta el 15-20 %, especialmente en el caso de áridos reciclados mixtos o cerámicos. En este sentido, existen

dos formas de abordar este aspecto: (1) realizar un aporte adicional de agua, o bien, (2) realizar una pre-saturación de los áridos reciclados.

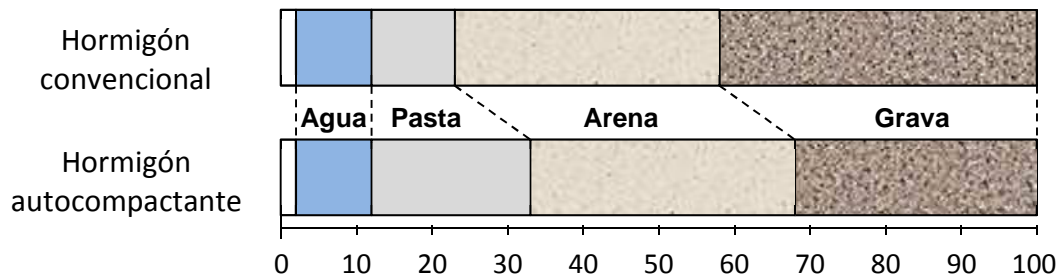


Figura 2.7. Fracciones granulométricas (Hormigón autocompactante vs convencional)

Ambas metodologías tienen puntos positivos y negativos. Con el primer método se corre el riesgo de aumentar la variabilidad del hormigón, dado que el cemento y los áridos reciclados tienen una cinética de absorción de agua diferente. Por el contrario, con la segunda metodología se consigue minimizar este riesgo a costa de ralentizar el proceso de fabricación, lo cual desde el punto de vista industrial, es un inconveniente

2.3.1 Métodos de dosificación

Una de las prácticas más habituales empleadas en la fabricación de un hormigón con un elevado porcentaje de árido reciclado es realizar el aporte de agua en dos etapas. Con esta metodología, se consigue mejorar la resistencia y durabilidad del hormigón, fortaleciendo la zona interfacial entre árido reciclado y la pasta, y consecuentemente, incrementando hasta en un 20 % la resistencia a compresión del hormigón (Tam *et al.* 2005)

Uno de los métodos de dosificación con mayor aceptación es el propuesto por Tam *et al.* (2005), basado en el desarrollado anteriormente por Tazawa *et al.* (1989). Dicho autor propone sustituir el tradicional método de dosificación “Normal Mixing Approach” (NMA) por el denominado “Two Stage Mixing Approach” (TSMA). Ambas metodologías vienen detalladas en la Figura 2.8.

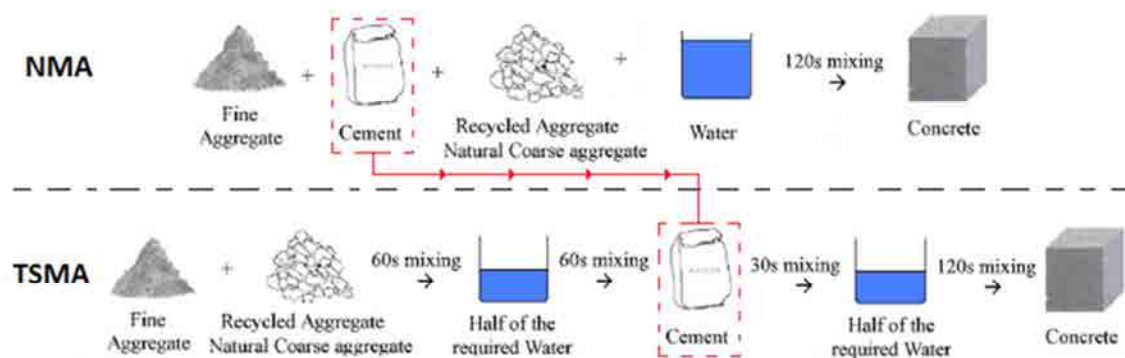


Figura 2.8. Comparativa entre el método NMA y el TSMA, propuesto por Tam *et al.* (2005)

La variación que adopta el método propuesto por Tam *et al.* (2005) es incorporar el cemento una vez los áridos han sido mojados y mezclados durante 60 segundos, en lugar de verterse conjuntamente y mezclarse en seco. Con esta modificación se garantiza que la superficie del árido reciclado esté hidratada en el momento de añadir el cemento.

Otro de los métodos de dosificación propuestos para tener en cuenta el efecto que introduce la utilización de áridos reciclados es el denominado “*Equivalent Mortar Volume*” (EMV), desarrollado por Fathifazl *et al.* (2009). El EMV basa su estrategia en tratar el árido reciclado como un compuesto de árido natural y mortero. Consecuentemente, se descuenta de la dosificación la parte proporcional de ambos componentes que ya se incorpora con los áridos reciclados. Según Jiménez *et al.* (2015), los hormigones fabricados siguiendo el método EMV muestran un mejor comportamiento medioambiental que los fabricados con métodos convencionales, reduciendo el volumen emitido de CO₂.

La adición de fibras se realiza al final del proceso de fabricación y requiere de un tiempo adicional de amasado, con el fin de garantizar que las fibras se distribuyen de forma homogénea, y así evitar la formación de erizos en la mezcla. Ferrara *et al.* (2007) ha desarrollado un método de dosificación para hormigones autocompactantes reforzados con fibras, considerando las fibras de acero como un árido más de los que componen esqueleto granular, y aplicando el concepto de diámetro superficial específico equivalente.

2.3.2 Trabajabilidad

La trabajabilidad de un hormigón depende en gran medida de la composición de su esqueleto granular (dos Santos, 2010, dos Santos *et al.*, 2015). La mayor rugosidad superficial de los áridos reciclados afecta negativamente a la fluidez del hormigón fabricado con éstos, en comparación con un hormigón convencional fabricado con una caliza natural (Tuyan *et al.*, 2014), especialmente en áridos reciclados mixtos con un elevado contenido de material cerámico. Este hecho puede corregirse, bien incrementando el contenido de aditivo superplastificante (Leite *et al.*, 2013), o bien, el contenido de finos.

Grdic *et al.* (2010) analizó la influencia de sustituir parcial (50 %) o totalmente (100 %) la fracción gruesa del esqueleto granular por árido reciclado. Este árido procedía del hormigón de un puente de Novi Sad (Serbia). Los resultados obtenidos confirman que, realizando las correcciones oportunas sobre el contenido de agua total aportada (debido a la mayor absorción del árido reciclado), la consistencia permanece constante.

En la misma línea, Kou y Poon (2009), obtienen extensiones de flujo similares o incluso superiores respecto un hormigón convencional, sustituyendo tanto la fracción gruesa como la fina, por áridos reciclados procedentes del machaqueo de hormigón. Para ello, los áridos se introdujeron en estado saturado con superficie seca. El volumen de agua de saturación a aportar viene definido por la capacidad de absorción y la humedad del árido.

La adición de fibras restringe el flujo del hormigón fresco, interactuando de forma similar a un árido de bajo coeficiente de forma. Tal y como se muestra en la Figura 2.9, la extensión de flujo se reduce de forma proporcional al parámetro denominado factor de fibra, definido como el volumen de fibras multiplicado por la relación de aspecto de éstas, independientemente de la naturaleza de las fibras: de acero (Grunewald y Walraven 2001) o de polipropileno (El-Dieb y Reda-Taha, 2012).

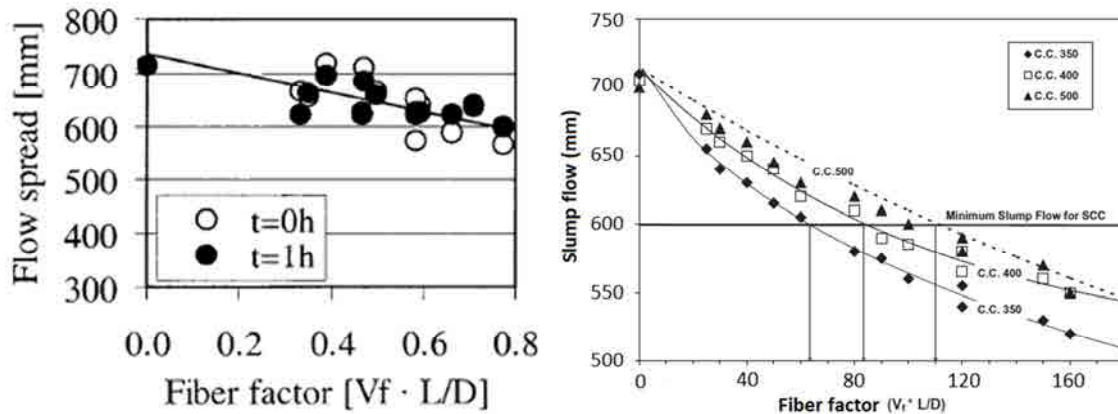


Figura 2.9. Influencia de las fibras en la extensión de flujo. a) de acero, b) de polipropileno

2.3.3 Puesta en obra

El empleo de un hormigón autocompactante con fibras lleva asociado una serie de beneficios. Por un lado, se consiguen reducir tiempos de ejecución, dado que se suprimen tareas como el ferrallado y colocación de la armadura convencional, o el vibrado del hormigón. Además, se mejoran aspectos relacionados con la seguridad y salud de los trabajadores en obra, reduciendo ruidos, vibraciones y riesgos asociados a la manipulación de la armadura de acero, como pinchazos o golpes.

Una tipología estructural donde estos hormigones pueden resultar muy atractivos son las cimentaciones. Según Ramos (2012), se verifica que la adición de fibras de acero (en contenidos moderados), resulta totalmente viable desde el punto de vista técnico. Dicho estudio se complementa con la propuesta de una serie de ábacos de dimensionamiento, a partir de los cuales, conocidos los esfuerzos a soportar y las dimensiones del pilote, se obtienen las cuantías de fibras necesarias.

2.4 HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ÁRIDO REICLADO MIXTO Y FIBRAS DE ACERO. PROPIEDADES MECÁNICAS

En caso que la sustitución se limite a un 20 % en peso sobre el contenido de árido grueso, las propiedades mecánicas del hormigón apenas se ven afectadas en relación a las

que presenta un hormigón convencional (CPH, 2008; Cachim, 2009). Para mayores % de sustitución se produce, en general, una reducción de las propiedades mecánicas del hormigón, que depende de las propiedades y tipo del árido reciclado. En este sentido, y a nivel particular de la resistencia a compresión de un árido reciclado cerámico (3-7 MPa), ésta puede llegar a ser hasta 40 veces inferior respecto a la de un árido natural (70-280 MPa) (Bazaz y Khayati, 2012)

2.4.1 Resistencia a compresión

Estudios previos han demostrado que, en hormigones con valores elevados de la relación agua/cemento (superiores a 0,55), la resistencia de un hormigón con árido reciclado puede ser comparable a la de uno convencional, incluso con sustituciones de hasta el 100 %. (Rao *et al.*, 2005). Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 2.10, a medida que la relación a/c disminuye, las diferencias entre ambos tipos de hormigones se acentúan (Sheen *et al.*, 2013), llegando a alcanzar el 25 % para relaciones a/c = 0,40.

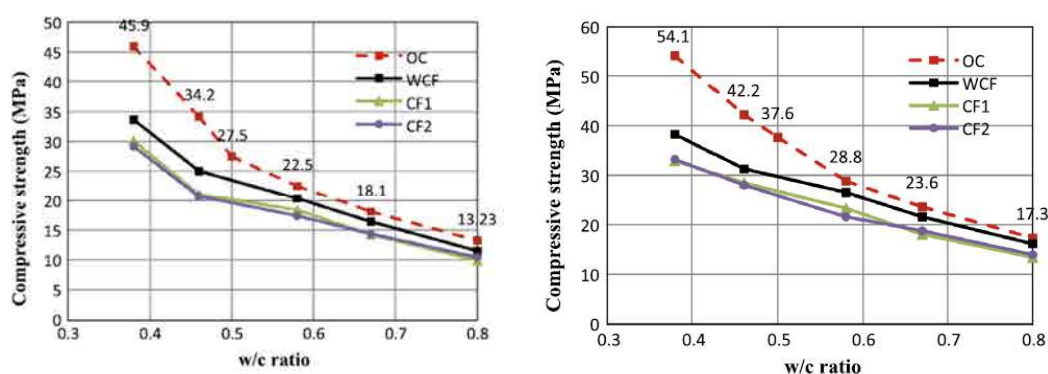


Figura 2.10. Evolución de resistencia a compresión en función de la relación a/c. a) 7 días, b) 28 días (Fuente: Sheen *et al.*, 2013)

A este respecto, Etxeberria *et al.* (2007) cuantifica en un 20-25 % la reducción de la resistencia a compresión, en caso de sustituir completamente la fracción gruesa por árido reciclado de hormigón (ARH), realizando un proceso de pre-saturación de los áridos, para una misma relación a/c (igual a 0,50) y un contenido de cemento de 325 kg/m³.

El fallo en un hormigón se produce por su punto menos resistente. Frecuentemente, en hormigones convencionales de resistencia moderada, la rotura se genera en el punto más débil, que se corresponde con la interfase árido-pasta. A medida que se disminuye la relación agua/cemento, tanto la pasta de hormigón como la interfase árido-pasta se fortalecen, lo que provoca un aumento exponencial de resistencia. Sin embargo, en hormigones con árido reciclado fabricados con relaciones a/c reducidas, dicho punto débil es el propio árido reciclado o el mortero adherido en él (Etxeberria *et al.*, 2007b). En consecuencia, las mejores prestaciones de la pasta no se reflejan en un incremento sustancial de resistencia del hormigón debido al efecto limitante de los áridos reciclados (Limbachiya *et al.*, 2000)

Este comportamiento provoca que, habitualmente, a igualdad del resto de componentes, la resistencia mecánica de un hormigón fabricado con árido reciclado sea inferior a un hormigón convencional, y viene condicionado por la calidad (y composición) del mismo. Por este motivo, la bibliografía especializada recomienda utilizar este tipo de áridos en hormigones de resistencia moderada, en el rango de resistencia a compresión comprendido entre los 20 y los 45 MPa. En hormigones de mayores prestaciones, su uso resulta inviable económicamente debido al incremento sustancial del cemento necesario.

En caso de realizar una sustitución del 25 y 50 % de la arena fina natural por árido reciclado fino (utilizando en todo caso un 100% de árido reciclado grueso), Kou y Poon, (2009) obtienen resistencias a compresión similares, si bien hay que compensar la pérdida de trabajabilidad que implica el cambio realizado. Para porcentajes de sustitución superiores, de entre el 75–100 %, se produce una reducción de resistencia del 10,1 y 11,3 %, respectivamente. González-Corominas y Etxeberria (2014) atribuyen el buen comportamiento resistente del árido reciclado fino cerámico a una cierta capacidad conglomerante debida a reacciones de tipo puzolánico, combinado con un proceso de curado interno provocado por la reserva de agua absorbida durante la fabricación del hormigón.

2.4.2 Módulo de elasticidad

En la Figura 2.11 se comparan los módulos de elasticidad obtenidos en cinco estudios previos (Etxeberria et al., 2007b; Rao *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2005; Kou *et al.*, 2008 y Li, 2003), en caso de sustituir al 100 % la fracción gruesa por árido reciclado. El módulo de elasticidad de un hormigón viene determinado principalmente por el esqueleto granular. Por ende, la sustitución total de la fracción gruesa de áridos naturales por reciclados incide negativamente sobre esta propiedad. Concretamente, en los estudios presentados en la figura la utilización de áridos reciclados reduce el módulo de elasticidad del hormigón entre un 15 y un 48 %.

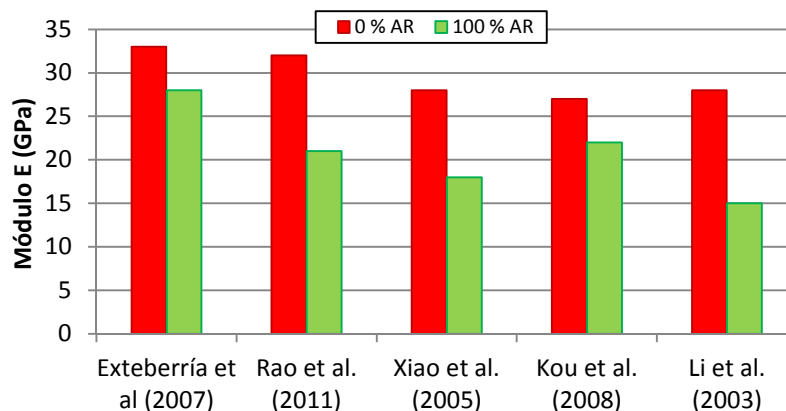


Figura 2.11. Influencia del árido reciclado sobre el módulo de elasticidad.
(Fuente: Behera et al. 2014. Elaboración propia)

La influencia del árido reciclado sobre el módulo de elasticidad es mayor que sobre otras propiedades mecánicas, como la resistencia a compresión, debido a dos motivos. Por un lado, la mayor deformabilidad del árido reciclado mixto respecto al árido natural, y por otro, una conexión más débil entre la antigua y la nueva interfase árido-pasta, con un mayor número de poros capilares y microfisuras.

En la Tabla 2.3 se recogen expresiones empíricas que relacionan el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión del hormigón. En cada caso, se detalla el tipo de árido reciclado utilizado y su granulometría (fina/gruesa).

Autor	Ecuación	Tipo de árido
Ravindrarajah y Tam (1985)	$E_c = 7,77 \cdot f_c^{0.33}$	ARH grueso
Kakizaki <i>et al.</i> (1988)	$E_c = 19 \cdot \left(\frac{f_c}{20}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1.5}$	ARH grueso
Dillmann (1998)	$E_c = 0,634 \cdot f_c + 3,057$	ARH grueso
Dhir <i>et al.</i> (1999)	$E_c = 0,370 \cdot f_c + 13,1$	ARH grueso
Mellmann (1999)	$E_c = 0,378 \cdot f_c + 8,242$	ARH grueso
Ravindrarajah <i>et al.</i> (2000)	$E_c = 3,02 \cdot f_c^{0.5} + 10,7$	ARH fino y grueso
Zilch y Roos (2001)	$E_c = 9,1 \cdot f_{ck}^{0.33} \cdot \left(\frac{\rho}{2400}\right)^2$	ARH grueso
Leite (2001)	$E_c = 4,63 \cdot f_c^{0.5} - 3,48$	RCD fino y grueso
Lovato (2007)	$E_c = 5,74 \cdot f_c^{0.5} - 13,4$	RCD fino y grueso
Evangelista y Brito (2007)	$E_c = 8,917 \cdot f_{ck}^{0.33} \cdot \left(\frac{\rho}{2348}\right)^2$	ARH grueso
Cabral <i>et al.</i> (2010)	$E_c = 2,58 \cdot f_c^{0.63}$	RCD fino y grueso
Corinaldesi (2010)	$E_c = 18,8 \cdot [(0,083 \cdot f_c)^{0.33}]$	ARH fino
Kou y Poon (2013)	$E_c = 2,9101 \cdot f_c^{0.5812}$	ARH grueso
Tangchirapat <i>et al.</i> (2013)	$E_c = 5,403 \cdot f_c^{0.5} - 5,73$	ARH grueso

Tabla 2.3. Relaciones propuestas entre f_c y E en hormigones con árido reciclado

La mayoría de las expresiones empíricas propuestas siguen el esquema $E = a \cdot f_c^b + c$, de acuerdo con las expresiones propuestas para hormigones convencionales por las normativas internacionales como el *Eurocode 2* (ENV, 1992), la *American Concrete Institute* (ACI 318, 2005), la *Fédération Internationale du Béton* (CEP-FIB, 2010) o la EHE-08 (CPH, 2008). Sin embargo, autores como Zilch y Roos (2001) o Evangelista y Brito (2007), introducen en la expresión la densidad del hormigón (ρ).

2.4.3 Resistencia a tracción

En la Figura 2.12a y 2.12b se presenta una recopilación de resultados obtenidos en estudios previos de la influencia del porcentaje de sustitución del árido reciclado grueso o fino, sobre la resistencia a tracción, respectivamente. En ambas gráficas, el eje de

ordenadas viene adimensionalizado por el coeficiente $f_{ct(RAC)}/f_{ct(NAC)}$ que relaciona la resistencia a tracción obtenida con el hormigón con árido reciclado en relación con su homólogo fabricado con árido natural.

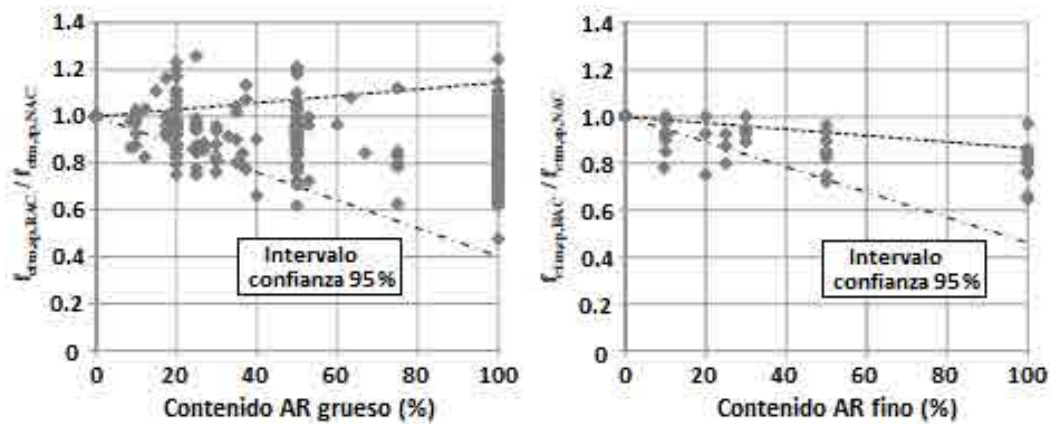


Figura 2.12. Influencia del % árido reciclado sobre la resistencia a tracción del hormigón. a) Árido grueso, b) árido fino (Fuente: Silva et al. 2015b)

Si bien la dispersión es elevada, porcentajes de sustitución inferiores al 20 %, no parecen influir significativamente, con valores del coeficiente $f_{ct(RAC)}/f_{ct(NAC)}$ comprendidos entre 0,8 y 1,25 y entre 0,8 y 1,0 para la fracción gruesa y fina, respectivamente. Para % de sustitución superiores la reducción media se sitúa entre el 15 y el 25 %, pudiendo alcanzar hasta el 40 % ($f_{ct(RAC)}/f_{ct(NAC)} = 0,6$) en los casos más desfavorables

2.4.4 Retracción

La instrucción EHE-08 afirma que la retracción del hormigón con árido reciclado aumenta para porcentajes de sustitución superiores al 20 % respecto a un hormigón convencional, estableciendo como valor orientativo una retracción del 50 % (1,5 veces) superior para una sustitución del 100 %. Si bien este valor puede variar significativamente debido a la calidad de los áridos reciclados utilizados, los coeficientes correctores propuestos por otras instituciones (RILEM) o países (Bélgica, Holanda) se encuentran en la misma línea.

En la Figura 2.13, se presenta la recopilación de resultados obtenidos en estudios previos llevada a cabo por Silva et al., (2015a). En dicha figura se relaciona la retracción de un hormigón con árido reciclado respecto un hormigón convencional, en función del porcentaje de sustitución realizado sobre la fracción gruesa del esqueleto granular.

Los resultados experimentales coinciden con las estimaciones recogidas en la EHE-08. Aunque la dispersión obtenida es bastante elevada, habiendo casos con retracciones inferiores a las producidas en hormigones convencionales ($\epsilon_{RAC}/\epsilon_{NAC} < 1,0$), la retracción para una sustitución del 100 % de árido grueso oscila entre un 10 y un 80 % superior, pudiendo alcanzar el 100 % ($\epsilon_{RAC}/\epsilon_{NAC} = 2,0$).

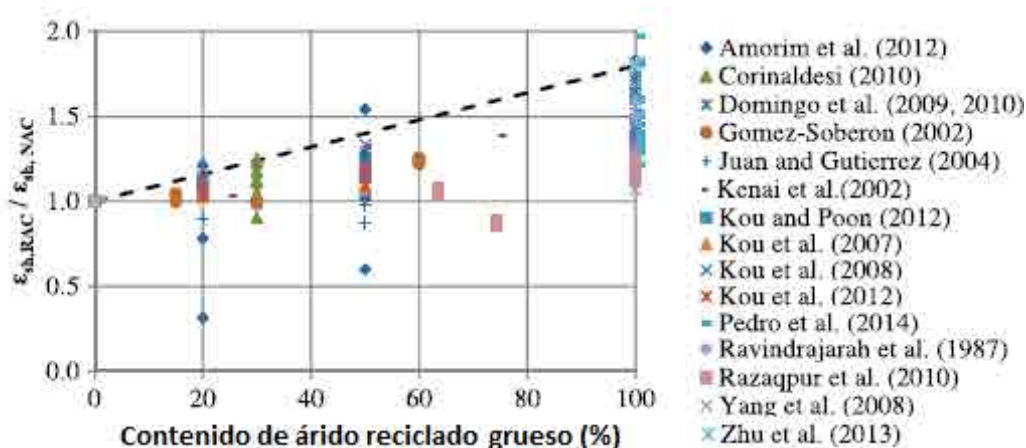


Figura 2.13. Influencia del % árido grueso reciclado sobre la retracción del hormigón
(Fuente: Silva et al. 2015a)

En caso que la sustitución de árido natural por reciclado se extienda no sólo a la fracción gruesa del esqueleto granular, sino también a la fina, la retracción por secado en este tipo de hormigones autocompactantes aumenta significativamente. Según los resultados obtenidos por Kou y Poon (2009), la retracción puede ser de hasta un 250 % superior, (1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ frente a 400 $\mu\text{m}/\text{m}$, a los 90 días), debido al mortero adherido.

Por el contrario, la utilización de fibras de acero reduce la magnitud de la retracción de un hormigón autocompactante, alcanzando valores del orden de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ a los seis meses (Corinaldesi y Moriconi, 2004), lo que supone una disminución de hasta el 37,5 % respecto un hormigón autocompactante sin fibras.

2.4.5 Fluencia

La instrucción EHE-08 afirma que la fluencia del hormigón con árido reciclado aumenta a partir de porcentajes de sustitución superiores al 20 %, estableciendo como valor orientativo una fluencia de 1,25 veces superior para una sustitución del 100 %. Si bien, se puntualiza que este valor puede variar significativamente debido a la gran variabilidad propia de los áridos reciclados.

La experiencia llevada a cabo por Domingo-Cabo *et al.* (2009) eleva hasta en un 35 %, 42 % y 51 %, la deformación por fluencia en caso que el porcentaje de sustitución sea del 20, 50 y 100 %, respectivamente. (Figura 2.14a). En caso, de trabajar con deformaciones por unidad de carga, las diferencias debidas al contenido de árido reciclado se reducen hasta el 25 %, 29% y 32 % (Figura 2.14b). En todo caso, las deformaciones registradas en el estudio se encuentran por debajo de los resultados analíticos obtenidos con los modelos propuestos por la ACI, la RILEM o la CEP-FIB.

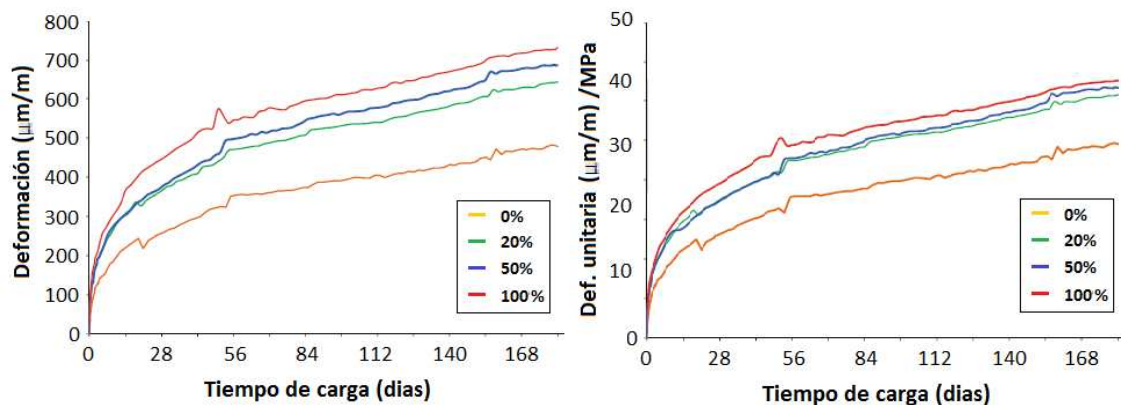


Figura 2.14. Influencia del % árido grueso reciclado sobre la fluencia del hormigón. a) Deformación total, b) Deformación unitaria (Fuente: Domingo-Cabo et al. 2009)

Para predecir la deformación por fluencia en hormigones con árido reciclado, Fathifazl y Razakpur (2013) proponen introducir el coeficiente K_{RCA} en los modelos reológicos ya existentes, tales como el propuesto por la ACI Committee 209, Burgers, Vaishnav-Kesler o Hansen, entre otros. Dicho coeficiente depende a su vez de dos parámetros: (K_{RM}) y (K_{RC}), que consideran variables como el contenido de árido reciclado, su peso específico o el módulo de elasticidad del hormigón.

2.4.6 Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson para hormigones con árido reciclado se sitúa en el rango comprendido entre 0,14 y 0,20, independientemente del ratio de sustitución (Martínez-Lage et al., 2012), lo que supone una disminución de hasta el 30 % respecto un hormigón convencional.

2.5 HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON ÁRIDO RECICLADO MIXTO Y FIBRAS DE ACERO. DURABILIDAD

La durabilidad de los hormigones fabricados con árido reciclado es uno de los aspectos más desconocidos y sobre los que los estudios han centrado recientemente su interés (Barra, 1996; Debieb et al., 2010; Kwan et al., 2012; Thomas et al., 2013; Bravo et al., 2015). En este sentido, los ensayos más habituales son los relacionados con la determinación de propiedades como la porosidad, la resistencia a la carbonatación, ciclos de hielo-deshielo, penetración de cloruros, y expansiones por reacción sulfática (Geraldés, 2013).

La instrucción EHE-08 (CPH, 2008) afirma que la durabilidad de un hormigón con un porcentaje no superior al 20 % de árido reciclado procedente del machaqueo de hormigón (ARH), es similar a la de uno convencional. Para porcentajes de sustitución superiores, la mayor porosidad del árido reciclado, que puede alcanzar el 11-14 % (Buyle-

Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002), puede hacer más susceptible al hormigón frente a los efectos del ambiente, por lo que se recomienda incrementar el contenido de cemento o disminuir la relación agua-cemento.

El uso de árido reciclado fino plantea una serie de dudas. Evangelista y De Brito (2010), consideran inadecuada la sustitución total de la fracción fina por árido reciclado en elementos estructurales, debido a las peores prestaciones en términos de durabilidad de este tipo de hormigones. Sin embargo, mantienen que una sustitución parcial, de hasta el 30 %, puede ser viable en estructuras protegidas de agentes externos, o bien, combinando su uso con adiciones como las cenizas volantes, escorias de alto horno o humo de sílice.

2.5.1 Penetración de cloruros

Villagran-Zaccardi *et al* (2008), considera que la resistencia a la penetración de cloruros en un hormigón con árido reciclado es similar a la de uno convencional. Ello se debe al efecto combinado de dos fenómenos. Por un lado, la utilización de árido reciclado aporta una cierta capacidad conglomerante, obteniendo un parámetro de Langmuir ($k_{c_{bm}}$) de entre el 120 y el 200 % superior. Por el contrario, la mayor porosidad de los áridos reciclados provoca un mayor ingreso de cloruros.

Los resultados obtenidos por Ann *et al.* (2008) en el test de penetración del ion cloruro, confirman que la carga que atraviesa un hormigón con árido reciclado (de hasta 7000 Coulombs) se reduce hasta en un 60 % gracias al uso de adiciones como la ceniza volante o escorias (< 3000 Coulombs). Por su parte, González-Corominas y Etxeberría (2014), obtienen valores muy inferiores en hormigones de alta resistencia fabricados con áridos reciclados, con cargas inferiores a 1000 Coulombs

2.5.2 Expansión por sulfatos

El árido reciclado puede contener sulfatos a través de diferentes fuentes. Las más comunes proceden de las partículas de yeso y del material cerámico. Debido a los problemas que pueden ocasionar estos sulfatos, tanto en cuestiones relativas a la estabilidad de la estructura como también de contaminación del agua o terreno adyacente debido a la lixiviación, Barbudo *et al.* (2012) propone limitar el contenido de yeso al 4,4 % y el material cerámico al 30%, para minimizar sus efectos.

Por su parte, Tovar-Rodríguez *et al.* (2013) propone revisar al alza el límite impuesto por la instrucción EHE-08 relacionado con el contenido de sulfatos solubles en ácido en los áridos, actualmente limitado al 0,8 % (independientemente de si son naturales o reciclados). Las expansiones registradas en su estudio no comprometen durabilidad del hormigón, a pesar de utilizar áridos reciclados con un contenido de sulfatos solubles de hasta 2,9 %.

2.5.3 Carbonatación

Los estudios realizados por Levy y Helene (2004), demuestran que la sustitución parcial, de entre un 20 y un 50 % (y en algunos casos del 100 %) del árido natural por árido reciclado, reduce la velocidad del proceso de carbonatación. Ello confirma que los resultados del ensayo de carbonatación vienen relacionados por la composición química de los materiales utilizados, y no únicamente de aspectos físicos del hormigón.

En cambio, otros autores como Amorim *et al.* (2012) o Pedro *et al.* (2014), detectan incrementos de entre el 15 y el 35 % de la velocidad de carbonatación en caso de realizar una sustitución total del árido natural por reciclado. En estos casos, los resultados se justifican debido al mayor volumen, y de mayor diámetro, de los poros producidos en los hormigones con árido reciclado (Kou y Poon, 2006)

2.5.4 Resistencia a hielo-deshielo

Según los resultados obtenidos en varios estudios, como los realizados por Richardson *et al.* (2011), Bazaz y Khayati (2012), y Medina *et al.* (2013), los hormigones fabricados con árido reciclado cerámico, son más resistentes frente a ciclos de hielo-deshielo que aquellos fabricados con áridos naturales. Este comportamiento puede deberse a la mayor porosidad propia de este tipo de áridos, que minimiza la formación de microfisuras durante el proceso.

2.5.5 Lixiviación

La lixiviación de algunos componentes presentes en el árido reciclado mixto, tales como el cromo (Cr), bromo (Br), sulfatos (SO₄), vanadio (V) o molibdeno (Mo), pueden resultar, *a priori*, potencialmente peligrosos. En la Tabla 2.4 se comparan los resultados del ensayo de lixiviación en tanque (NEN 7373) realizados por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco (IHOBE, 2011), con los valores máximos admisibles. Dichos contaminantes se estabilizan una vez se incorporan en el hormigón, reduciéndose significativamente las tasas de movilización por difusión, hasta valores muy por debajo de los máximos admisibles. Según dicho estudio, ello valida la utilización de áridos mixtos en la fabricación de hormigones para aplicaciones en contacto con el terreno.

Componente	Inmisión 100 años	Inmisión máxima
Cr	1,37	795
Br	8,93	1408
SO ₄	2361	295097
V	6,8	1020
Mo	0,11	15

Tabla 2.4. Comparativa entre inmisión e inmisión máxima aceptable (en mg/m²)

2.6 CONCLUSIONES

- Existen aspectos normativos donde es posible incidir y corregir en el futuro, a fin de incentivar el uso (con totales garantías), de los áridos reciclados mixtos en usos estructurales. Las actuales restricciones impuestas en el anejo 15 de la EHE-08 no se encuentran en línea con los áridos producidos en España, que presentan elevados contenidos de material cerámico.
- La sustitución parcial o total de la fracción gruesa del esqueleto granular por árido reciclado puede producir una disminución de las prestaciones mecánicas como la resistencia a compresión, módulo de elasticidad o aumentar la retracción y fluencia del hormigón.
- En cambio, algunos estudios inciden en una posible mejora de la durabilidad del material debido a reacciones de tipo puzolánico y de hidratación diferida debido al material cerámico y a la reserva de agua acumulada durante la fabricación del hormigón, respectivamente. En este sentido, debe remarcarse que debido a la alta variabilidad en cuanto a la composición propia de los áridos reciclados, junto con el hecho que se trate de investigaciones relativamente recientes, el estado del conocimiento actual presenta opiniones discrepantes.

CAPÍTULO 3

CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han expuesto las restricciones a nivel normativo en cuanto al uso estructural de hormigones en los que se emplean áridos reciclados en su composición. En investigaciones previas, tales como el Proyecto GEAR (GERD, 2012) o la Investigación pre-normativa del Gobierno vasco (IHOBE, 2011), ya se ha demostrado que estas limitaciones pueden estar, excesivamente, del lado de la seguridad. Por tanto, recurrir a mayores porcentajes de sustitución del árido natural por árido reciclado conduce, en función del tipo de aplicación, a respuestas estructurales del material adecuadas y con garantías de durabilidad del mismo.

En este contexto y dentro del objetivo general de la tesis de mostrar la viabilidad de una mayor utilización de áridos en aplicaciones estructurales, el **objetivo** del presente capítulo consiste en **describir las tres campañas experimentales** realizadas (una campaña en planta, una en laboratorio, junto con la prueba piloto en obra), justificando las decisiones tomadas en aspectos fundamentales; así como la metodología y los materiales empleados o los ensayos previstos para la caracterización del hormigón desarrollado.

En la Tabla 3.1 se muestran las novedades más significativas que se introducen en las campañas experimentales respecto a las recomendaciones del anejo 15 de la Instrucción EHE-08 (CPH, 2008). En este sentido, se proponen avances significativos, tanto en aspectos relacionados con el árido reciclado como al empleo de fibras. Si bien el estudio

puede generalizarse para un gran número de tipologías estructurales, éste se ha focalizado en la aplicación en pantallas o pilotes. En definitiva, se pretende analizar el uso de hormigones reforzados con fibras de acero cuya fracción gruesa del esqueleto granular esté formado al 100 % por árido reciclado mixto, en estructuras en contacto directo con el terreno, como cimentaciones o pantallas de contención. Principalmente, en aquellos casos donde el refuerzo venga condicionado por razones termo-higrométricas.

Aspecto	EHE-08	Tesis Doctoral
% máx. sustitución árido reciclado (fracción gruesa)	20%	100%
Tipo de árido reciclado	Machaqueo hormigón	Mixto
% absorción árido reciclado	< 7%	> 7%
Tipo de refuerzo	Armadura convencional	Fibras de acero

Tabla 3.1. Innovaciones introducidas en las campañas experimentales

En estos elementos, el armado tradicional utilizado habitualmente resulta excesivo, lo que frecuentemente ocasiona problemas durante su ejecución, aparte de no resultar una solución óptima económicamente. Otra propiedad que puede resultar muy interesante de introducir en estos elementos estructurales es la autocompactabilidad.

La oportunidad de llevar a cabo este estudio, tal como se ha comentado en el capítulo 1, surgió con las obras de construcción de un aparcamiento subterráneo que la empresa *FCC Construcción S.A* realizó en la C/Badajoz de Barcelona. Concretamente, se ejecutaron 6 pantallas de sostenimiento con unas dimensiones aproximadas de 3,5 x 2,5 x 0,6 m.

En el desarrollo del capítulo, en primer lugar, se describe el plan de trabajo seguido (Apartado 3.2), argumentando el cómo y el porqué de las decisiones adoptadas. A continuación, en el apartado 3.3, se presentan los resultados obtenidos tras la caracterización de los materiales necesarios para la fabricación del hormigón, incidiendo en las propiedades de los áridos reciclados, tales como su densidad aparente (ρ_r), real (ρ_a), absorción a las 24h (WA_{24}) o composición.

Una vez descritos los materiales empleados, se detallan las dosificaciones (Apartado 3.4), el proceso de fabricación de las amasadas y el plan de ensayos para las probetas moldeadas durante las dos primeras campañas experimentales: 1ª campaña en planta y 2ª campaña en laboratorio (Apartado 3.5).

El capítulo se completa con la 3ª campaña experimental (Apartado 3.6), donde se describe la extracción de las pantallas de la obra, el proceso de obtención de probetas-testigo y de las losas, y el ensayo de éstas en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luís Agulló de la UPC (LTE Luís Agulló, de aquí en adelante).

3.2 PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo previsto inicialmente constaba de dos campañas experimentales. Una primera, a realizar en el LTE Luís Agulló, que serviría para analizar las propiedades físicas y mecánicas de unas dosificaciones de partida, y una segunda campaña empleando las dosificaciones que mejor comportamiento hubieran alcanzado durante la campaña anterior. Para completar el estudio y evaluar la viabilidad de utilizar un HRF con una fracción gruesa compuesta al 100% por árido reciclado, con finalidad estructural, estas dosificaciones se emplearían en la construcción de pilotes o pantallas.

Esta planificación fue modificada ante la posibilidad de realizar la prueba piloto de forma inmediata (junto con la 1ª campaña), siendo necesario modificar el orden de las campañas. Finalmente el plan de trabajo adoptado, junto con los objetivos marcados en cada una de las campañas experimentales se muestra en la Tabla 3.2.

Campaña experimental	Fecha	Objetivos
Fabricación en planta (1ª campaña)	14-03-2012 4 amasadas	<ul style="list-style-type: none"> • Detectar dificultades durante el proceso de amasado • Estudiar comportamiento materiales experimentales • Ejecutar tramo de prueba: 6 pantallas (3+3) • Analizar propiedades físicas y mecánicas del hormigón
	13-04-2012 3 amasadas	
Optimización en laboratorio (2ª campaña)	02-07-2012 03-07-2012 6 amasadas	<ul style="list-style-type: none"> • Plantear mejoras de la 1ª campaña en base a los conocimientos adquiridos • Contrastar y ampliar resultados 1ª campaña
Prueba piloto (3ª campaña)	Puesta en obra 14-03-12 13-04-12	<ul style="list-style-type: none"> • Constatar dificultades durante la puesta en obra y plantear soluciones a ellas. • Detectar deficiencias de puesta en obra (segregación áridos y/o fibras), para proponer futuras mejoras de ejecución • Analizar elemento estructural a escala real (placas) • Analizar propiedades físicas y mecánicas (testigos)
	Extracción batches (julio 2012)	
	Ensayo de placas (nov'12 - ene'13)	
	Ensayo de testigos (abril - junio'13)	

Tabla 3.2. *Objetivos para cada campaña experimental*

La 1ª campaña experimental se desarrolló en dos fases: 14 de marzo de 2012 (1ª fase) y 13 de abril de 2012 (2ª fase). Tal y como se ha indicado en la tabla anterior, uno de sus principales objetivos era comprobar la influencia de los materiales empleados en el proceso de amasado y corregir las dificultades que fueran apareciendo.

En esta campaña se realizaron un total de 7 amasadas, cuatro de ellas durante la 1ª fase y tres más durante la 2ª fase. A medida que los hormigones satisfacían, en planta, los requisitos de autocompactabilidad establecidos ($\emptyset_{EXT} > 55$ cm), se trasladaban en camión hasta la obra, para ejecutar las pantallas previstas en la prueba piloto. En este sentido,

todas las amasadas alcanzaron el diámetro de extensión de flujo necesario y no hubo que desechar ninguna.

El estudio se amplió con la 2ª campaña experimental realizada durante el mes de julio de 2012 en el LTE Luís Agulló, donde se reprodujeron seis de las dosificaciones fabricadas en la 1ª campaña. El objetivo de esta campaña era contrastar y ampliar los resultados obtenidos de la anterior, en un entorno de trabajo más controlado.

Por último, cuando los trabajos de excavación en la obra avanzaron y alcanzaron cotas más profundas, las pantallas de sostenimiento ejecutadas durante el tramo de prueba fueron cortadas y retiradas. En la 3ª campaña experimental se incluye el proceso de corte, extracción y ensayo de los testigos y placas obtenidas.

3.3 MATERIALES EMPLEADOS

El **cemento** empleado en todas las dosificaciones realizadas durante las campañas experimentales fue del tipo CEM II/A-M (V-L) 42,5 R, con una densidad de 3,06 t/m³ y una superficie Blaine de 4930 cm²/g. Con las adiciones incluidas (cenizas volantes y filler calizo), se persiguen varios objetivos: mejorar la trabajabilidad en estado fresco, así como su resistencia a largo plazo y reducir el coste económico del cemento, presentándose en la Tabla 3.3, los resultados obtenidos con el análisis químico realizado sobre éste.

Análisis químico (%)		Composición (%)	
SiO ₂	19,63	C ₃ S	27,40
Al ₂ O ₃	5,98	C ₂ S	35,62
Fe ₂ O ₃	4,68	C ₃ A	7,93
CaO	57,38	C ₄ AF	14,25
MgO	1,64		
SO ₃	3,54		
Álcalis equiv. (0,658K ₂ O+Na ₂ O)	0,66		
Cl	0,005		

Tabla 3.3. Análisis químico del cemento CEM II/A-M (V-L) 42.5R

Del análisis químico puede destacarse el elevado contenido de sulfatos (3,54 %), que sumados a los presentes en los áridos reciclados mixtos (yeso, vidrio, etc.), pueden ocasionar problemas de expansiones diferidas. Una decisión que podría haberse tomado para minimizar esta problemática era la utilización de un cemento sulfatorresistente (tipo SR), con un porcentaje de C₃A en su composición inferior al 5 %. Sin embargo, se ha optado por emplear esta tipología de cemento dado que es uno de los más utilizados el entorno de Barcelona, especialmente en cimentaciones, y se ha pretendido hacer una investigación con una vertiente realista, orientada a la aplicación.

La nomenclatura utilizada para referirse a los áridos empleados, tanto naturales como reciclados, se ha tomado siguiendo las pautas dadas en el Artículo 28.2 de la Instrucción EHE-08 (CPH, 2008). De este modo, se incide en aspectos como la fracción granulométrica, la forma como se obtienen y la naturaleza del mismo, tal y como se expresa a continuación:

$$d/D - IL - N$$

donde d/D : Fracción granulométrica, comprendida entre tamaño mínimo d y máximo D
IL: Proceso de obtención del árido. En todo caso proviene de trituración (T)
n: Naturaleza del árido. Que será:
C, en el caso de árido calizo
R, en el caso de árido reciclado

Los **áridos naturales**, son calizas de granulometría 0/4 y 6/12, referenciados según 0/4-T-C y 6/12-T-C, respectivamente. Ambos proceden de la cantera Vallcarca, situada en el macizo del Garraf (Barcelona). Además, se han empleado dos tipos de **árido reciclado**, uno de granulometría 4/12 (4/12-T-R), mostrado en la Figura 3.1a y otro de granulometría 12/20 (12/20-T-R), mostrado en la Figura 3.1b.

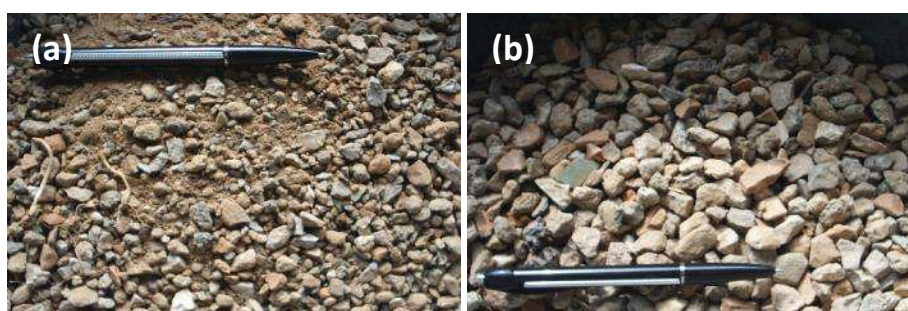


Figura 3.1. Aspecto de los áridos reciclados, a) 4/12-T-R, b) 12/20-T-R

Como se aprecia en ambas imágenes, el árido reciclado está compuesto principalmente por mortero, árido limpio y cerámica, además de otros componentes minoritarios como vidrio, yeso, madera e incluso materia orgánica. Los áridos fueron proporcionados por la empresa *Gestora de Runes del Llobregat S.A.*, procedentes de su planta de tratamiento del Moll del Prat, en el Puerto de Barcelona. De éstos se analizaron su distribución granulométrica, su composición, y propiedades físicas, tales como su densidad y absorción.

Las curvas granulométricas de los cuatro tipos de áridos utilizados (naturales y reciclados), obtenidas de acuerdo con las normas españolas UNE-EN 933-1 (AENOR, 1998) y UNE-EN 933-2 (AENOR, 1996a), se muestran en la Figura 3.2. La distribución de tamaños del árido 4/12-T-R es muy uniforme, ya que un 67,00 % del total de la muestra se

encuentra comprendida entre los 4 y 12 mm, un 28,84 % en la fracción intermedia de entre 0,125 y 4 mm, y una fracción fina (inferior a 0,125 mm) del 4,16 %.

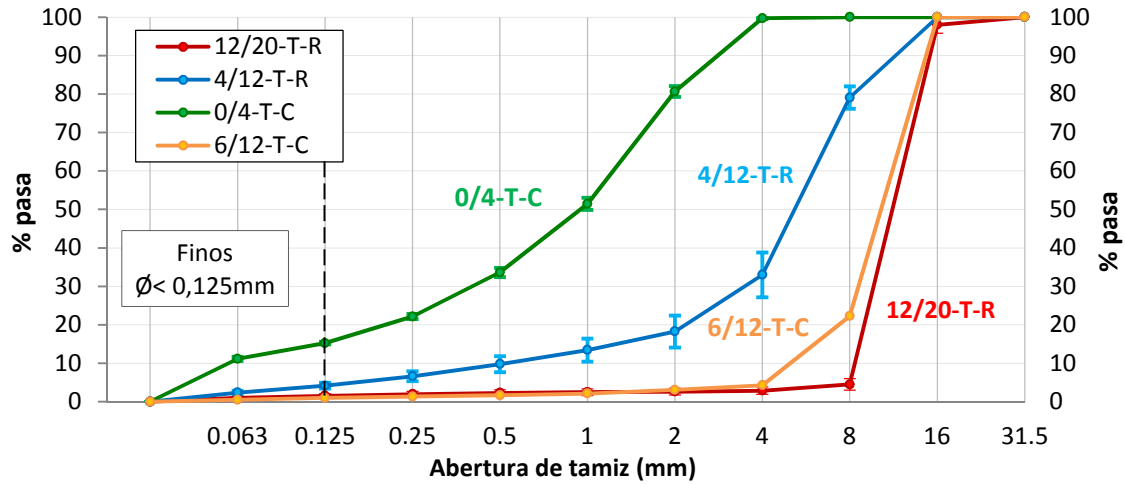


Figura 3.2. Curvas granulométricas de los áridos

A diferencia de lo observado con el árido 4/12-T-R, un 93,47 % del árido reciclado 12/20-T-R se concentra en una única fracción granulométrica (8/16 mm), mientras que el porcentaje de finos se limita a un escaso 1,53 %. Por su parte, los áridos naturales 0/4-T-C y 6/12-T-C, cumplen con las condiciones granulométricas exigidas por el Artículo 28.3 de la EHE-08. Un hecho a destacar es el elevado contenido de partículas inferiores a 0,125 mm (15,25 %) presentes en el árido 0/4-T-C, que pueden favorecer a aumentar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco.

Para obtener la composición de los dos tipos de áridos reciclados utilizados, se ha seguido la metodología propuesta por la norma UNE-EN 933-11 (AENOR, 2009a). Los resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tipo de árido	Composición (en %)				
	Árido sin mortero	Árido con mortero	Cerámica	Vidrio	Otros
4/12-T-R	59,87	31,47	6,66	0,05	1,95
12/20-T-R	46,47	34,09	15,47	0,26	3,71

Tabla 3.4. Composición de los áridos reciclados (en %)

El material granular natural (sin mortero adherido) es el componente más común en ambas muestras, con un porcentaje del 59,87 % para el árido 4/12-T-R y del 46,47 % para el 12/20-T-R. El segundo componente más frecuente es el mortero o árido con mortero adherido, representando entre un 31-34 % del total. En ambos áridos, la suma de

estos dos componentes representa más del 80 % del total de la muestra, exactamente el 91,34 % en el 4/12-T-R y el 80,56 % en el 12/20-T-R.

Dado que la procedencia de los dos áridos reciclados es la misma, de los valores de la Tabla 3.4 se desprende la influencia que ejerce el tratamiento de obtención sobre su composición. Cuanto más fina sea la granulometría a obtener, el proceso de machaqueo requiere de mayor intensidad para conseguir el producto deseado, y por tanto, mayor es la probabilidad de conseguir separar por completo el mortero adherido de los áridos.

La cerámica es el tercer componente más presente, con un porcentaje que asciende al 6,66 % en el árido 4/12-T-R y al 15,47 % en el 12/20-T-R. Por último, a pesar que los elementos minoritarios como vidrio, yeso, plásticos y madera, apenas alcanzan un porcentaje del 1,95 % y del 3,71 %, representan uno de los mayores inconvenientes para su utilización, debido a los sulfatos que puedan contener (Barbudo *et al.*, 2012). En este sentido, en la planificación de las campañas experimentales han sido incluidos una serie de ensayos de durabilidad para analizar el efecto que éstos pueden ocasionar sobre los hormigones fabricados.

Según la Guía Española de Áridos Reciclados (GERD, 2012), las composiciones obtenidas en los áridos empleados, se sitúan dentro de los rangos habituales de los áridos reciclados tratados en España. El árido 12/20-T-R se cataloga en la categoría de **áridos reciclado mixto de hormigón** (ARMh), mientras que el 4/12-T-R como **árido reciclado de hormigón** (ARH).

La caracterización de los áridos reciclados se completa con la determinación de la densidad y la absorción de agua a las 24 horas, de acuerdo con las normativas UNE-EN 1097-3 (AENOR, 1999) y UNE-EN 1097-6 (AENOR, 2001), mostrándose en la Tabla 3.5 los resultados obtenidos.

Tipo árido	ρ aparente (t/m ³)	ρ real (t/m ³)	Absorción 24 h (%)
4/12-T-R	2,67	2,06	11,06
12/20-T-R	2,61	2,19	7,30

Tabla 3.5. Propiedades físicas de los áridos reciclados

Tal y como se ha mostrado en el Capítulo 2 (Figura 2.3 y Figura 2.4), ambos parámetros vienen influenciados por la composición y la granulometría de los áridos reciclados. Por un lado, la densidad de los áridos reciclados utilizados se sitúa entre un 15-20 % inferior a la habitual en un árido natural ($\rho = 2,65 - 2,70$ t/m³). En cuanto a la capacidad de absorción de agua a las 24 horas, estudios previos, como la Investigación prenormativa del Gobierno vasco (IHOBE, 2011), la relacionan directamente con el contenido de material cerámico. Sin embargo, los resultados de la Tabla 3.5 muestran que, además de esta variable, la granulometría del árido influye significativamente sobre la absorción, en línea con lo expuesto por Silva *et al.* (2014).

A pesar que el % de material cerámico y mortero es inferior en el árido 4/12-T-R, su absorción es mayor que la que presenta el árido 12/20-T-R. Ello es debido a que su superficie específica es mayor, lo cual favorece la absorción de agua durante las primeras 24 horas. Hay que recordar que, pese a tomarse como referencia esta propiedad, el árido reciclado puede seguir absorbiendo agua más allá de las 24 horas, tal y como han demostrado otros autores como García *et al.* (2014) o Djerbi Tegguer (2012).

Otra conclusión que se extrae de la caracterización llevada a cabo, es la necesidad de alterar el proceso de fabricación de los hormigones. En ambos casos se supera el límite de absorción del 7 % establecido en el Anejo 15 de la EHE-08 (CPH, 2008), siendo necesario aplicar, durante las campañas experimentales, un tratamiento de pre-saturación.

Para analizar la influencia que ejerce el tipo de fibra empleado, tanto en la fabricación y puesta en obra, como en el comportamiento resistente del hormigón, se ha decidido utilizar dos tipos de **fibras de acero**: MASTERFIBER 503 (M503) y MASTERFIBER 502 (M502), cuyas propiedades se presentan en la Tabla 3.6.

Tipo fibra	f_{ct} (N/mm ²)	l_f (mm)	\varnothing_f (mm)	λ (l_f/\varnothing_f)	Nº fibras/kg	Forma
M502	1000 ± 150	50 ± 5	1,0 ± 0,1	50	3000	Extremos conformados
M503	1200 ± 180	35 ± 4	0,75 ± 0,08	46	8000	

Tabla 3.6. Propiedades de las fibras

Por último, los **aditivos químicos** utilizados fueron, un plastificante y un superplastificante (POZZOLITH 390GV y GLENIUM C303SCC, respectivamente), así como un aditivo experimental, que impide la absorción de agua del árido reciclado. Este aditivo genera una película hidrófuga alrededor de los áridos reciclados, imposibilitando que éstos absorban agua. Tanto las fibras de acero como los aditivos fueron proporcionados por la empresa *BASF Construction Chemicals España, S.L.* Las fichas técnicas de los materiales empleados durante las campañas experimentales se detallan en el ANEJO A.

3.4 DOSIFICACIONES REALIZADAS

La dosificación patrón (HM/AC12) se ha definido en base a las recomendaciones existentes para la fabricación de hormigones autocompactantes (Okamura y Ouchi, 2003; Skarendahl y Petersson, 2000), y de la dosificación habitualmente utilizada para la construcción de elementos de cimentación como pantallas y pilotes. Dada la necesidad de tener un esqueleto granular con un contenido de finos comprendido entre 540 y 600 kg/m³ (Cavalaro, 2009), el contenido de cemento se fijó en 355 kg/m³, 1230 kg/m³ de arena 0/4-T-C y 580 kg/m³ de árido 6/12-T-C. El contenido de agua aportada fue de 170 l/m³, lo que equivale a una relación a/c = 0,479.

La dosificación de aditivos químicos se adoptó por motivos económicos, y consiste en el empleo combinado de un aditivo a base de lignosulfato (POZZOLITH 390GV) en cantidad igual a 2,2 l/m³ (0,6 % s.p.c) y 6,8 l/m³ (2,0 % s.p.c) de aditivo superplastificante de policarboxilato GLENIUM C303SCC.

El resto de dosificaciones se definieron en base a la dosificación patrón, realizando las modificaciones oportunas en función de las incidencias detectadas y de las particularidades que se introducían en cada una de ellas: áridos reciclados, fibras de acero, combinación de ambos. Esa práctica se debe a fin de facilitar el análisis de resultados (presentados en los Capítulos 4, 5 y 6), y detectar la influencia ejercida individualmente por cada componente sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

La nomenclatura utilizada para la tipificación de los hormigones fabricados se ha tomado adaptando las indicaciones dadas tanto en el Artículo 39.2, como en los Anejos 15 y 17 de la Instrucción EHE-08. (CPH, 2008). Ésta tiene en cuenta aspectos relativos a los materiales empleados (tipo de árido y tipo de fibra), así como de la consistencia del hormigón, tal y como se expresa a continuación:

$$T / C \quad TM - TF + I$$

- donde: T: Indicativo del tipo de hormigón utilizado. Que será:
 HM, en el caso de hormigón en masa con árido grueso natural
 HRM, en el caso de hormigón en masa con árido grueso reciclado
 HRF, en caso de hormigón reforzado con fibras con árido grueso reciclado.
- C: Tipo de consistencia. En todo caso, será autocompactante (AC)
- TM: Tamaño máximo de árido, ya sea natural o reciclado.
- TF: Longitud máxima de la fibra (si contiene)
- I: Aditivo inhibidor de absorción (si contiene)

Para cumplir con mayor facilidad con los requisitos de autocompactabilidad, la sustitución de árido natural por árido reciclado se complementó sistemáticamente con un incremento del contenido de cemento de 15 kg/m³, hasta los 370 kg/m³. A su vez, a fin de contrarrestar el efecto restrictivo que provocan las fibras en el fluir del hormigón (Grünewald y Walraven, 2001) (El-Dieb y Reda Taha, 2012), la adición de fibras de acero se compensó incrementando el contenido de aditivo superplastificante desde los 6,8 hasta los 7,3 l/m³. En la Tabla 3.7 se muestran las dosificaciones realizadas durante la campaña en planta.

En la tabla se detalla, no solo el contenido de árido reciclado utilizado en cada dosificación, sino también el contenido estimado de cada componente presente en éstos:

árido sin mortero, árido con mortero, cerámica, etc. Los valores dados se han obtenido a partir de las composiciones de los dos áridos reciclados 4/12-T-R y 12/20-T-R detalladas anteriormente en la Tabla 3.4. Se ha creído conveniente realizar esta descomposición con el objetivo de facilitar el posterior análisis de resultados, dada la diferente influencia que ejerce cada componente sobre las propiedades físicas y resistentes del hormigón.

Material	Contenido (kg/m ³)						
	HM/AC 12	HRM/AC 12	HRF/AC 12-35a	HRM/AC 20	HRM/AC 20+I	HRF/AC 12-35b	HRF/AC 20-50
Cemento	355	370	370	370	370	370	370
0/4-T-C	1230	1200	1240	1210	1210	1260	1260
6/12-T-C	580	--	--	--	--	--	--
4/12-T-R (Árido sin mortero) (Árido con mortero) (Material cerámico) (Agua de saturación) (Otros)	--	590 (318) (167) (35) (59) (11)	540 (291) (153) (32) (54) (10)	180 (97) (51) (11) (18) (3)	200 (108) (57) (12) (20) (3)	520 (280) (147) (31) (52) (9)	180 (97) (51) (11) (18) (3)
12/20-T-R (Árido sin mortero) (Árido con mortero) (Material cerámico) (Agua de saturación) (Otros)	--	--	--	360 (151) (111) (50) (36) (12)	390 (168) (123) (56) (39) (13)	--	340 (142) (104) (47) (34) (11)
Fibra acero M502	--	--	--	--	--	--	20
Fibra acero M503	--	--	20	--	--	20	--
Agua ¹	170	165	170	150	170	175	160
Inhibidor	--	--	--	--	1,5	--	--
POZZOLITH 390GV	2,2	2,6	2,6	2,2	2,6	2,6	2,6
GLENIUM C303SCC	6,8	6,8	6,8 (7,3)	6,8	6,8	7,3	7,3
Total	2344	2334,4	2349,9	2279	2350,9	2354,9	2339,9
Contenido de finos	548,4	577,5	581,5	567,4	568,7	583,7	574,5
a/c efectiva	0,479	0,446	0,459	0,405	0,459	0,473	0,432
Vol. amasado (m ³)	3	3	6	6	6	6	6

¹ Se muestra el contenido estimado final, tras la aportación adicional necesaria para satisfacer los requisitos de autocompactabilidad. El dato no incluye el agua aportada para saturar los áridos reciclados.

Tabla 3.7. Dosificaciones realizadas en la campaña en planta (1ª campaña)

Debe aclararse que debido a las incidencias surgidas durante el proceso de amasado de la dosificación HRF/AC12-35a, con dificultades para satisfacer los requisitos de autocompactabilidad, junto con las incertidumbres para determinar con exactitud el contenido final de agua aportada, hizo necesaria la repetición de dicha dosificación durante la 2ª Fase de la campaña (Dosificación HRF/AC/12-35b), realizando ligeras modificaciones sobre el esqueleto granular.

Las dosificaciones correspondientes a la 2ª campaña, realizada en el LTE Luis Agulló, no son exactamente las mismas que las de la 1ª campaña. En ella se introducen pequeñas variaciones que mejoran el proceso de fabricación, adaptándolo a las condiciones de laboratorio en lugar de una planta industrial utilizada en la 1ª campaña. El número de dosificaciones realizadas durante la 2ª campaña experimental se reduce de siete a seis (detalladas en la Tabla 3.8), una vez corregidas las dificultades que llevaron a reproducir la dosificación HRF/AC12-35.

Material	Contenido (kg/m³)					
	HM/AC 12	HRM/AC 12	HRM/AC 20	HRM/AC 20+I	HRF/AC 12-35 [b]	HRF/AC 20-50
Cemento	355	370	370	370	370	370
0/4-T-C	1230	1200	1210	1210	1260	1260
6/12-T-C	580	--	--	--	--	--
4/12-T-R (Árido sin mortero) (Árido con mortero) (Material cerámico) (Otros)	--	590 (353) (186) (39) (12)	180 (108) (57) (12) (4)	200 (120) (63) (13) (4)	520 (311) (164) (35) (10)	180 (108) (57) (12) (4)
12/20-T-R (Árido sin mortero) (Árido con mortero) (Material cerámico) (Otros)	--	--	360 (167) (123) (56) (14)	360 (181) (133) (60) (15)	--	340 (158) (116) (53) (14)
Fibra acero M502	--	--	--	--	--	20
Fibra acero M503	--	--	--	--	20	--
Agua	170	160	150	185	175	165
Agua de saturación	--	31,7	18,2	--	27,9	17,7
Inhibidor	--	--	--	1,5	--	--
POZZOLITH 390GV	2,2	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
GLENIUM C303SCC	7,3	7,3	6,8	9,7 ¹	7,3	7,3
Total	2344	2329,4	2279	2330,8	2339,9	2339,9
Contenido de finos	548,4	577,5	567,4	568,7	583,7	574,5
a/c efectiva	0,479	0,432	0,405	0,500	0,473	0,446
Vol. amasado (l)	30	30	30	30	20 ²	20 ²

¹ El contenido de aditivo superplastificante tuvo que aumentarse hasta los 9,7 l/m³ (2,6 % s.p.c) para satisfacer los requisitos de autocompactabilidad.
² En las dosificaciones HRF, se realizaron dos amasadas de 20 litros cada una, para un total de 40 litros

Tabla 3.8. Dosificaciones realizadas en la campaña en laboratorio (2ª campaña)

3.5 FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

3.5.1 Campaña en planta (1ª campaña)

La fabricación de los hormigones tuvo lugar en la planta dosificadora de la empresa Hormigones Uniland S.L, situada en el Polígono Industrial de la Zona Franca (Barcelona), bajo cubierta. Los áridos reciclados se almacenaban protegidos, si bien no ensilados sino depositados sobre una losa de hormigón. Durante la 1ª campaña experimental se realizaron las siete dosificaciones detalladas anteriormente en la Tabla 3.7. El proceso de amasado varía en función de los materiales empleados en cada dosificación (áridos reciclados, fibras de acero, aditivos), siguiendo el esquema mostrado en la Figura 3.3.

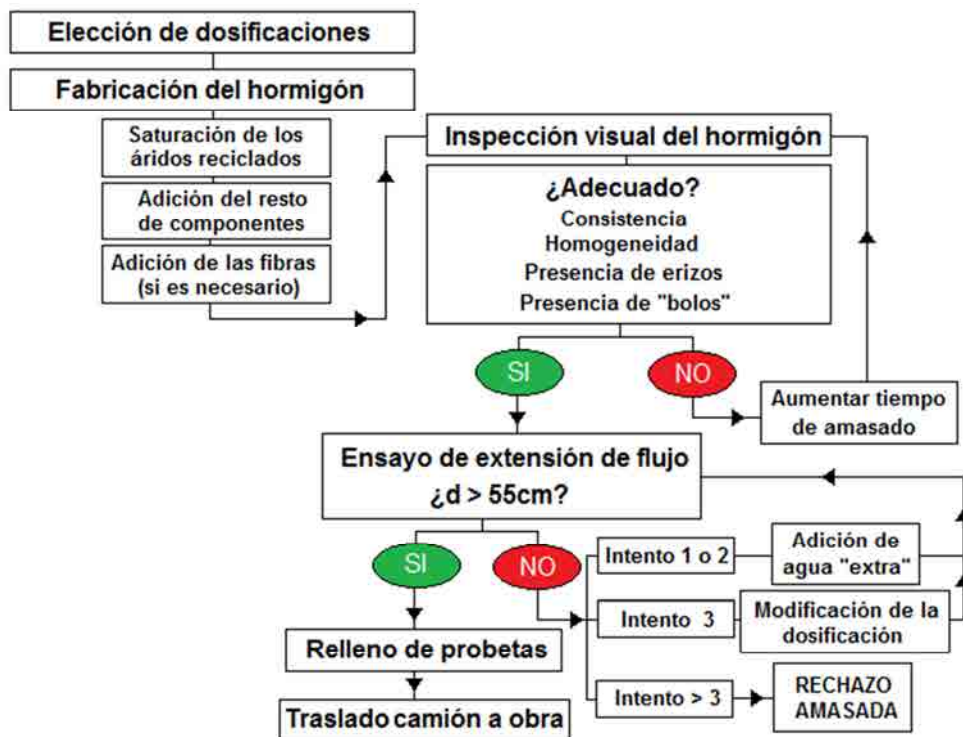


Figura 3.3. Diagrama de decisión en planta

En los siguientes puntos se hace una descripción de las fases seguidas durante la fabricación del hormigón. Iniciándose por el pretratamiento de saturación de los áridos reciclados, la adición manual de fibras, y finalmente, una vez verificada las propiedades autocompactantes del hormigón, el transporte a obra del mismo.

Pretratamiento del árido reciclado (Toda dosificación excepto HM/AC12)

El proceso de fabricación empezaba (salvo en la dosificación de referencia HM/AC12), con la pre-saturación de los áridos reciclados. Los áridos reciclados, tal como se ha mostrado en la Tabla 3.5, presentan una absorción de agua superior al límite del 7 %

dado por la Instrucción EHE-08, por lo que es conveniente modificar el procedimiento de amasado empleado en hormigones convencionales. En este sentido, durante las campañas experimentales se ha optado por los dos procedimientos descritos a continuación:

➤ Tratamiento con aditivo inhibidor de absorción (dosificación HRM/AC-20+I)

Esta metodología de saturación de los áridos reciclados requería la utilización de un aditivo experimental desarrollado por la empresa *BASF Construction Chemicals España S.L.* La principal ventaja que ofrece este tratamiento es que su dosificación es independiente del grado de humedad que presenten los áridos en el momento de fabricación. A partir de estudios previos realizados por la empresa BASF, el contenido a añadir estaba predeterminado, e igual al 0,23% sobre peso de árido reciclado (s.p.AR).

El mezclado del aditivo con los áridos reciclados se prolonga durante un tiempo de 4-5 minutos, a intensidad moderada. Durante este periodo, el aditivo envuelve y genera una película hidrófuga alrededor de los áridos, impidiendo que posteriormente puedan absorber agua. Una vez transcurrido ese tiempo, los áridos ya se encuentran preparados para ser dosificados junto con el resto de materiales. En la Figura 3.4a se visualiza el aspecto del aditivo empleado.

➤ Saturación con agua (resto de dosificaciones HRM y HRF):

La cantidad de agua necesaria depende de la capacidad de absorción y del grado de humedad que tenga el árido reciclado en el momento de la fabricación de los hormigones. Durante la campaña realizada en planta, dado que no se había podido realizar, todavía, la caracterización de los áridos, se estimó que el agua necesaria para saturarlos completamente se situaba en 100 litros por tonelada de árido. Este valor se calculó en base a diversos factores, como las condiciones climáticas, el modo de almacenamiento de los áridos y la tipología de árido reciclado ($\omega = 2-5 \%$; $WA_{24h} = 10-15 \%$). El aporte de agua se realizó por medio de una manguera, tal y como se muestra en la Figura 3.4b.

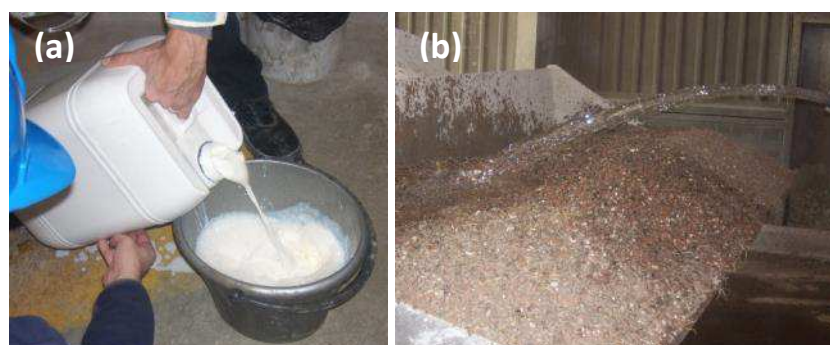


Figura 3.4. Pretratamiento sobre los áridos reciclados. a) Aditivo, b) Saturación con agua

Los áridos reciclados, ya saturados, se depositaron sobre la cinta transportadora encargada de conducirlos hasta la planta dosificadora. En ella se mezcló con el conjunto de

áridos (para asegurar la homogeneidad de la humedad), e iniciar el proceso de fabricación propiamente dicho.

Adición de las fibras (Dosificaciones HRF/AC12-35a-b y HRF/AC20-50)

En las tres dosificaciones de HRF, el proceso de fabricación constaba de una etapa adicional: la adición de fibras. Para minimizar los riesgos asociados al uso de fibras, como la formación de erizos, y dado que la central no disponía de dosificador de fibras, éstas fueron introducidos manualmente desde la parte superior del camión hormigonera en funcionamiento, tal y como se muestra en la Figura 3.6a.

Por otro lado, para favorecer la buena mezcla en el camión y dado que éste se llenaba de dos fases (de 3 m³ para un camión de 6 m³ de capacidad), las fibras se incorporaban al final de cada fase en la parte correspondiente ($C_f = 20 \text{ kg/m}^3$), siguiendo el esquema mostrado en la Figura 3.5

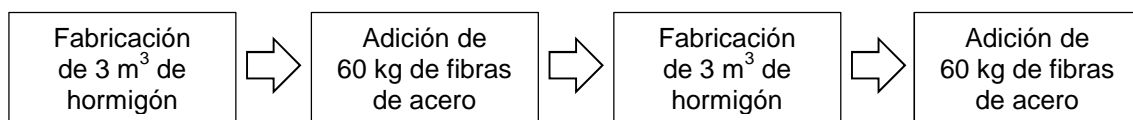


Figura 3.5. Proceso de adición de fibras

Verificación de la autocompactabilidad

Una vez finalizado el amasado, parte del hormigón se vertía por la cubeta trasera del camión para realizar una primera inspección visual. En caso de apreciarse algún tipo de deficiencia, tales como las mostradas en la Figura 3.6 (b-c), se adoptaban las medidas necesarias para corregir tal situación, como incrementar el tiempo de amasado, modificar dosificaciones o añadir agua, entre otras. Si por el contrario, el aspecto de la mezcla era el adecuado, se realizaba el ensayo de extensión de flujo, para verificar la autocompactabilidad del hormigón.

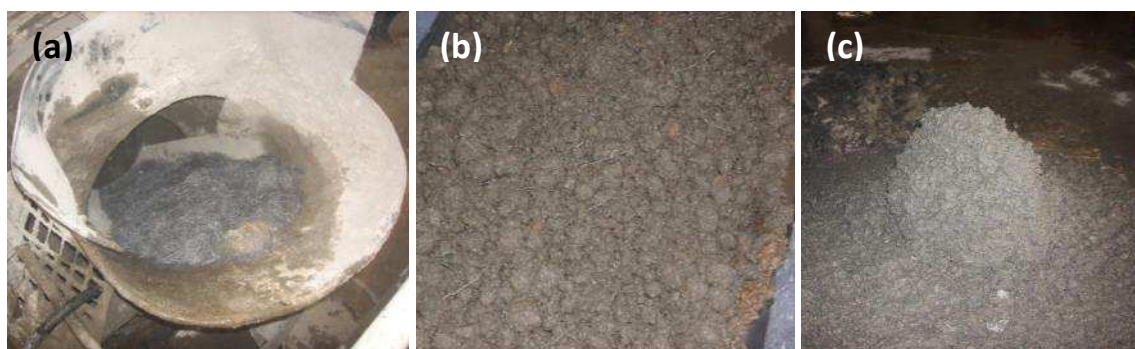


Figura 3.6. HA-R12-20/35a. a) Adición fibras, b) Aspecto seco, c) Conos formados.

Si el resultado del ensayo era un diámetro inferior a los 55 cm, se realizaba un aporte adicional de agua, tomando nota de esa incidencia. A continuación se mezclaba a alta intensidad durante 2 minutos adicionales, para posteriormente volver a realizar el ensayo. Si nuevamente, el ensayo daba un resultado insuficiente, se planteaba la posibilidad de aportar más agua, o bien, realizar una modificación más profunda de la dosificación, incrementando el contenido de aditivo superplastificante.

Transporte y puesta a obra

A medida que los hormigones fabricados en planta satisfacían los requisitos mínimos exigidos de autocompactabilidad, parte del hormigón se utilizaba para el relleno de probetas que posteriormente serían ensayadas, mientras que el resto se transportaba en camión hormigonera hasta el tramo de prueba situado en obra. El trayecto a recorrer, así como la localización de la obra (C/Badajoz), se muestra en las imágenes de la Figura 3.7.



Figura 3.7. a) Recorrido desde planta de hormigonado a obra, b) Detalle de la localización

El trayecto, de unos 15 km, se efectuó sin incidencias remarcables en un intervalo de tiempo que osciló entre los 20 y los 30 minutos. Ello favoreció que, en el momento de su puesta en obra, la pérdida de trabajabilidad del hormigón respecto la obtenida en planta no fuese excesiva, y se mantuvieran las propiedades autocompactantes.

El procedimiento constructivo empleado en la prueba piloto, fue el habitual para la construcción de muros pantallas compuestos por bataches. Éste, al ser un procedimiento de excavación seguro en sí mismo, se emplea habitualmente en zonas de riesgo de desplome del terreno, especialmente en aquellos casos con afección a edificios, viales, etc. y/o cuando no se puede realizar un apuntalamiento o entibado. Consiste en excavar el terreno por fases (con anchuras comprendidas entre 2 y 3 metros), en lugar de excavar de una sola vez toda la longitud necesaria. Las diferentes fases que componen el procedimiento constructivo se muestran en la Figura 3.8, con imágenes tomadas en obra.

En primer lugar, se realiza la excavación de la zanja con las dimensiones establecidas (aproximadamente: 3 m de profundidad, 2,5 m de longitud y 0,6 m de anchura). Con posterioridad, para evitar posibles desmoronamientos de las paredes

laterales, se rellena la zanja con lodos tixotrópicos, los cuales interactúan con el terreno formando una material cohesionante.

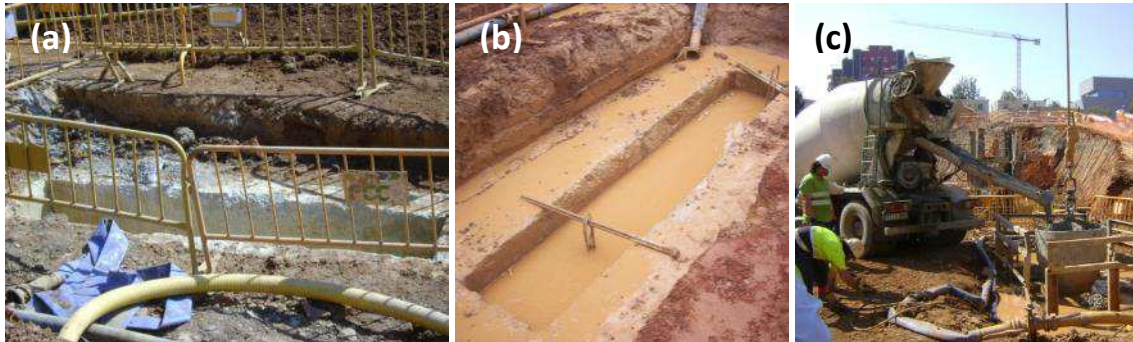


Figura 3.8. Procedimiento constructivo:
a) Zanja excavada, b) Lodos tixotrópicos, c) Vertido del hormigón desde camión

Por último, se vierte el hormigón directamente desde el camión hormigonera mediante cubilote y un tubo tremie, empezando el vertido desde el fondo de la excavación y elevando paulatinamente el tubo hasta alcanzar la superficie. Para garantizar la continuidad del elemento estructural y evitar la presencia de coqueras, el extremo del tubo queda, en todo momento, sumergido en la masa de hormigón fresco. De este modo, a medida el hormigón rellena la zanja (de abajo hacia arriba), el exceso de lodo emerge hasta la superficie, como consecuencia de su menor densidad.

3.5.2 Campaña en laboratorio (2ª campaña)

Tres meses después de llevar a cabo de la 1ª campaña experimental, se realizaron las dosificaciones dadas anteriormente en la Tabla 3.8, reproduciendo y/u optimizando las realizadas durante la campaña en planta. Con estas premisas, tuvo lugar la campaña en laboratorio, durante los días 2 y 3 de julio de 2012 en las instalaciones del LTE Luis Agulló.

Determinación del agua de saturación de los áridos reciclados

Una de las principales modificaciones introducidas en la campaña en el LTE Luis Agulló, recae en el proceso de fabricación, y concretamente en la diferenciación explícita entre **agua libre** (encargada de hidratar las partículas de cemento) y **agua de saturación** de los áridos reciclados. Mientras que durante la 1ª campaña, la saturación de los áridos reciclados se realizó de forma orientativa (aportando 100 l por tonelada de árido), en esta 2ª campaña el proceso se estableció a partir de las propiedades físicas, como el grado de humedad (w) o la absorción a 24 horas (WA_{24h}) de los áridos reciclados, según la expresión [3.1]:

$$\text{Agua de saturación (\% s.p. AR)} = (WA_{24h} - w) \cdot \beta \quad [3.1]$$

donde: WA_{24h} : Absorción de agua a las 24h (en %)

- ω : Humedad de los áridos (en %)
- β : Factor de ajuste. Relación entre agua absorbida a los 10 min y a las 24 h. (Figura 2.6b)

Dado que los datos de absorción de los áridos reciclados se obtuvieron a las 24 h, y por el contrario, el proceso de amasado de cada dosificación se prolonga durante apenas 5–10 min, es necesario aportar un contenido de agua de saturación menor al teórico. En base a la experiencia y de la bibliografía especializada (IHOBE, 2011; Djerbi Tegger, 2012) se aportó a la mezcla únicamente el 80% del agua de saturación teórica.

El otro parámetro que interviene en la expresión [3.1], es la humedad presente en los áridos (ω). Ésta se determinó minutos antes de iniciar el proceso de fabricación, adoptando el procedimiento descrito a continuación, y obteniendo los valores mostrados en la Tabla 3.9.

- Se anota el peso (P_{nat}) de una muestra de árido reciclado en estado natural. A continuación se introduce la muestra durante 5 minutos en un microondas, se deja enfriar y se anota su peso (P_{seco}).
- Se determina la humedad (w) de los áridos mediante la ecuación [3.2]:

$$\omega(\%) = \frac{P_{nat} - P_{seco}}{P_{nat}} \cdot 100 \tag{3.2}$$

Tipo árido	02 de julio de 2012			03 de julio 2012		
	P_{nat} (g)	P_{seco} (g)	ω (%)	P_{nat} (g)	P_{seco} (g)	ω (%)
4/12-T-R	543,4	522,2	3,90	676,5	661,6	2,20
12/20-T-R	653,2	626,2	4,13	1225,9	1215,6	0,84

Tabla 3.9. Humedad presente en los áridos reciclados

Las condiciones climáticas calurosas del día 3 de julio de 2012, junto con el hecho que los áridos reciclados se acopiaban en silos metálicos expuestos al sol, han incidido en la variación de la humedad de los áridos entre los dos días que duró la campaña, con reducciones del 43% para el árido 4/12-T-R, y del 80% en el árido 12/20-T-R.

Proceso de amasado

Otra de las diferencias entre las dos campañas experimentales realizadas, es el volumen de amasado con el que se trabaja. Mientras que durante la 1ª campaña, las amasadas fueron de 6 m³, necesarios para rellenar el camión hormigonera y ejecutar cada uno de los bataches, durante la 2ª campaña el volumen se reduce hasta los 30 litros (capacidad máxima de la amasadora COLLOMATIC 65-2 K3). El procedimiento de amasado empleado se describe en los siguientes puntos, siguiendo una pauta similar a la recomendada por Tam *et al.* (2005)

- Mezcla de los áridos reciclados y el agua de saturación, que se prolonga durante 1 minuto a intensidad alta.
- Mezcla de los áridos reciclados ya saturados con la arena natural 0/4-T-C, durante otro minuto más.
- Adición del cemento CEM-IIA-M/42.5R (Figura 3.9a) sobre los áridos y se mezcla en seco durante 30" adicionales.
- Una vez transcurrido este intervalo, se añaden 2/3 del total de agua libre (Figura 3.9b). La mezcla de áridos, cemento y agua se prolonga durante otro minuto.
- Finalmente, se vierten los dos aditivos: el plastificante y el superplastificante (Figura 3.9c); las fibras de acero (Figura 3.9d), y el tercio de agua libre. Se realiza una última mezcla a alta intensidad durante 90 segundos.



Figura 3.9. Adición de materiales.

a) Cemento, b) 2/3 agua libre, c) Aditivos, d) Fibras de acero (si es necesario)

Verificación de autocompactabilidad

Para verificar que los hormigones fabricados cumplieran con las condiciones impuestas a un hormigón autocompactante, nada más acabar el proceso de amasado, se sometían al ensayo de extensión de flujo, según la norma UNE-EN 12350-8 (AENOR, 2011a). Para mayor representatividad del ensayo, se tomaba como resultado el valor medio de dos diámetros perpendiculares entre ellos: d_1 y d_2 (Figura 3.10a). En caso de alcanzarse el diámetro mínimo de 55 cm, se procedía al relleno de las probetas correspondientes con el hormigón restante en la amasadora (Figura 3.10b).

Una vez transcurridas 24 horas desde su fabricación, las probetas se desmoldaban y almacenaban en la cámara húmeda del LTE Luis Agulló (Figura 3.10c), en condiciones estables de humedad relativa (100 %) y temperatura (20 °C), hasta el momento en que fueron ensayadas.

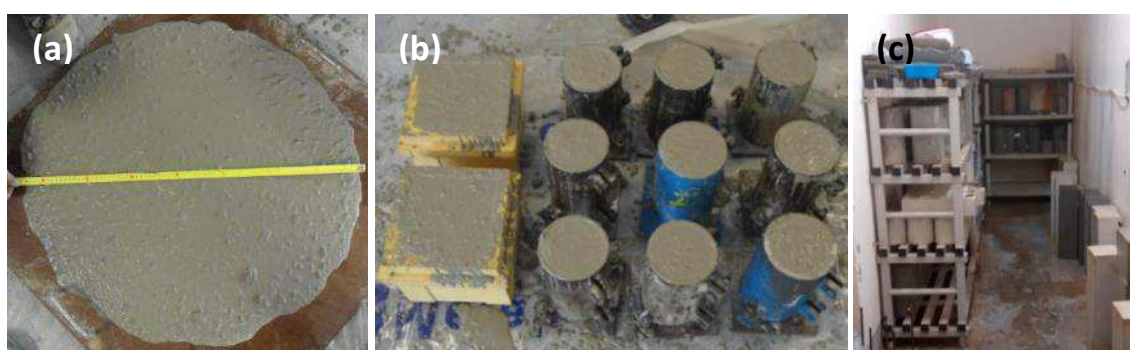


Figura 3.10. a) Ensayo de extensión de flujo, b) Probetas moldeadas, c) Cámara húmeda LTE

3.5.3 Plan de ensayos: probetas moldeadas en 1ª y 2ª campaña

En este apartado se detalla el plan de ensayos propuesto para las probetas moldeadas durante las dos campañas ya comentadas (planta y LTE Luis Agulló). En la Tabla 3.10 se muestran las propiedades estudiadas del hormigón, la normativa utilizada, así como las edades de ensayos, tipo de probetas utilizadas y el número de ellas en cada determinación. En el caso de no haber seguido una normativa, se detalla la referencia que presenta el método empleado, tales como: el método inductivo, desarrollado por Torrents *et al.* (2012) si bien está basado en la antigua norma UNE 83512-1 (AENOR, 2005); o el método multidireccional, propuesto por Pujadas *et al.* (2014b)

Propiedades	Norma	Campaña	Dosificación	Tipo probeta	Edad ensayo	Nº probetas
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3:2011	Planta UNILAND	Todas	Cilíndrica 150x300	7	2
					28	3 ¹
					90	1 ²
					365	1
		LTE	Todas	Cilíndrica 100x200	7	3
					28	3
365	3					
Resistencia a flexión	UNE-EN 12390-5:2011	Planta UNILAND	HRM y HRF	Prismáticas 100x100x400	28	3
Módulo de elasticidad	UNE 83316:1996	LTE	Todas	Cilíndrica 100x200	28	3
					365	3
Resistencia residual y Tenacidad	UNE 83315:2010	LTE	HRF/AC12-35 HRF/AC20-50	Cilíndrica 150x150	28	2
	Multidireccional (Pujadas <i>et al.</i> 2014b)	LTE	HRF/AC12-35 HRF/AC20-50	Cúbica 150x150x150	28	3

1 Para la dosificación HM/AC12, 2 probetas
2 Para la dosificación HM/AC12, 0 probetas

Tabla 3.10a. Plan de ensayos a nivel probeta (Propiedades mecánicas)

Propiedades	Norma	Campaña	Dosificación	Tipo probeta	Edad ensayo	Nº probetas
Porosidad Densidad	UNE-EN 1936	Planta UNILAND	Todas	Cúbica 150x150x150	180	1
					365	1
Orientación de fibras	Método Inductivo (Torrents <i>et al.</i> 2015)	Planta UNILAND	HRF/AC12-35 HRF/AC20-50	Cúbica 150x150x150	-	3
		LTE	HRF/AC12-35 HRF/AC20-50	Cúbica 150x150x150	-	5
Prof. de penetración	UNE-EN 12390-8:2011	Planta UNILAND	Todas	Cilíndrica 150x150 ¹	> 28	1

¹ Obtenidas a partir de cortar una probeta cilíndrica 150 x 300 en dos mitades

Tabla 3.10b. Plan de ensayos a nivel probeta (Propiedades físicas)

Determinación de propiedades mecánicas

Los ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas, como la resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad, fueron llevados a cabo empleando la máquina de ensayos de compresión Ibertest de 3 MN de capacidad de carga (Figura 3.11a), que permite tanto el control del ensayo por carga o por desplazamiento. Para uniformizar las caras de ensayo, y eliminar las irregularidades superficiales en las probetas, se ha utilizado la pulidora mostrada en la Figura 3.11b.

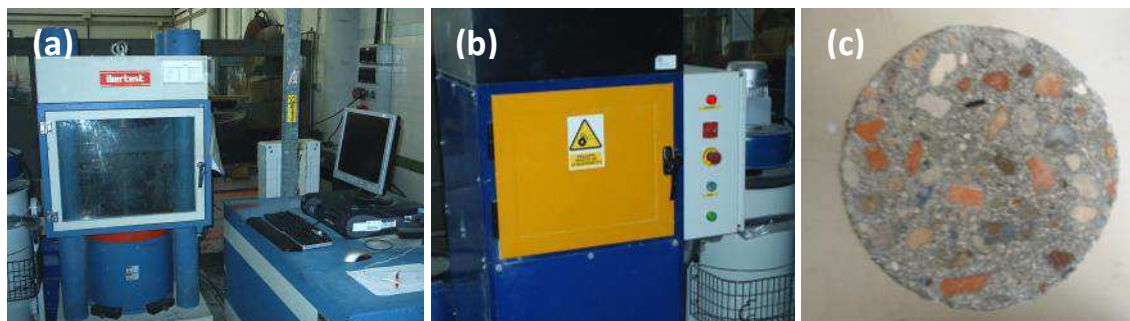


Figura 3.11. a) Prensa Ibertest, b) Equipo para el pulido de testigos, c) Aspecto final

El ensayo de resistencia a compresión se realizó siguiendo la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2011b). La carga aplicada sobre las probetas se incrementa a velocidad constante, e igual a 0,5 MPa/s.

Para los ensayos de resistencia a flexión, de las dos metodologías de ensayo contempladas en la normativa UNE-EN 12390-5 (AENOR, 2009b), se adoptó el método de referencia, es decir, el de dos puntos de carga respecto a la disposición de un único punto de carga central, con la disposición mostrada en la Figura 3.12a.

Durante el ensayo de determinación del módulo de elasticidad, a 28 días, se aplican tres ciclos de carga-descarga (Figura 3.12b), tal y como especifica la norma UNE 83316 (AENOR, 1996b). La carga máxima a aplicar, igual al 25-30 % de la carga de rotura, se

determinó en base a las resistencias a compresión a 7 días, obtenidas en los ensayos previamente realizados.

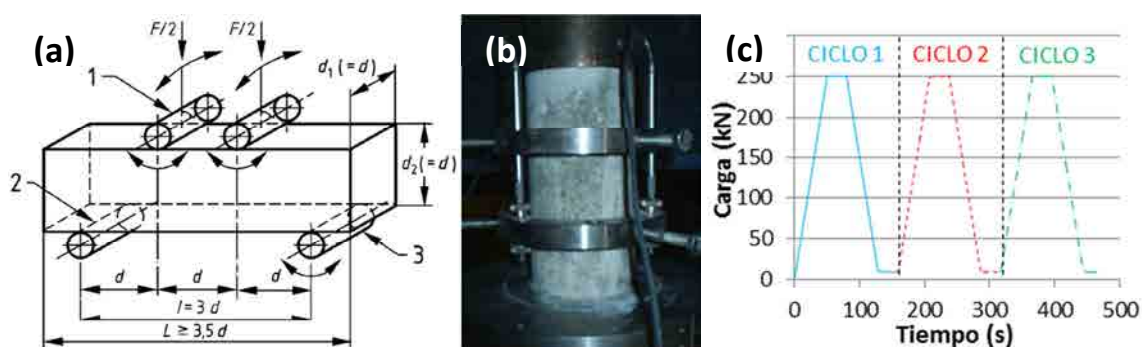


Figura 3.12. a) Ensayo de flexión; b) Configuración y c) Ciclos de carga del ensayo módulo E

Aprovechando el carácter no destructivo del ensayo UNE 83316 (AENOR, 1996b), se decidió determinar sobre una misma probeta (las ensayadas a 28 y 365 días) dos propiedades básicas de un hormigón: el módulo de elasticidad, y posteriormente, la resistencia a compresión. De este modo, ha podido analizarse la influencia que ejerce sobre ambos la inclusión de áridos reciclados y fibras de acero, así como la validez de las expresiones existentes que relacionan ambas propiedades en este tipo de hormigones.

La resistencia residual y la tenacidad, se determinaron por dos metodologías diferentes, dependiendo del tipo de probeta a ensayar: cilíndrica o cúbica. En el primer caso, se realizó el ensayo Barcelona original (AENOR, 2010), empleando la cadena extensométrica que registra la deformación circunferencial. En el segundo caso, se realizó la adaptación del ensayo Barcelona para probeta cúbica, desarrollada por Pujadas (2013), en la que únicamente se registra el descenso del pistón y el número de fisuras producidas

Determinación de propiedades físicas

La determinación de propiedades físicas como la densidad y la porosidad de los diferentes hormigones fabricados se realizó empleando una probeta cúbica de 150 x 150 mm por dosificación. Sobre cada una de las probetas a analizar, se aplicó el plan de corte mostrado en la Figura 3.13, de forma que se obtuvieron 4 muestras prismáticas de 75 x 75 x 150 mm para cada dosificación.

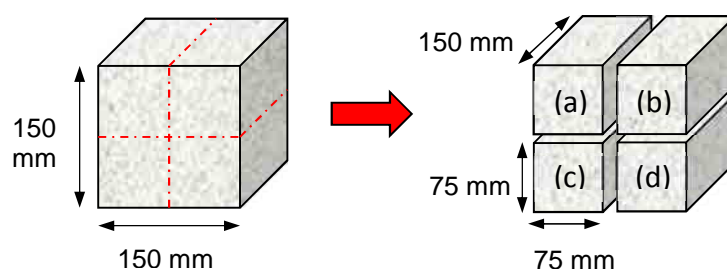


Figura 3.13a. Proceso de corte de las probetas cúbicas (esquema)

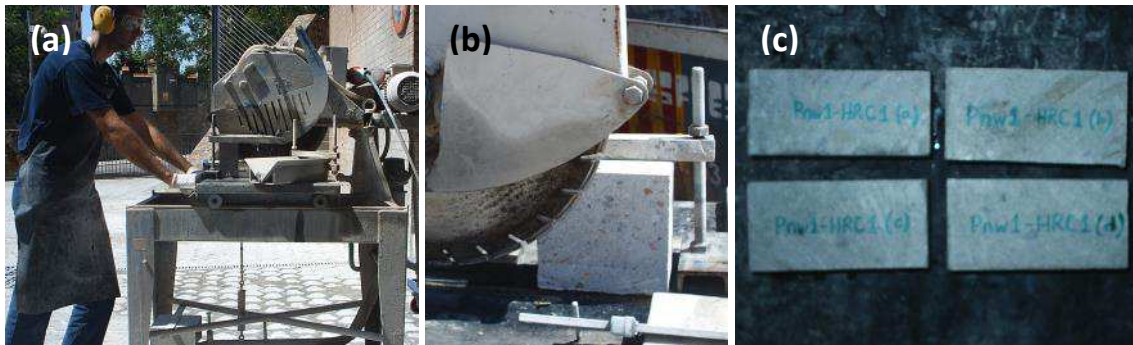


Figura 3.13b. a) y b) Proceso de corte de probetas, c) Muestras obtenidas por dosificación

La determinación de la densidad y la porosidad se realizó según la norma UNE-EN 1936 (AENOR, 2007a). Para evitar la degradación de la muestra se empleó una temperatura de secado de 65° C¹ hasta alcanzar un peso constante (aproximadamente tras 210 horas). A partir de los diferentes pesos de la probeta: masa en inmersión (m_{inm}), masa en estado saturado con superficie seca (m_{sss}) y masa seca en estufa (m_{seca}), se obtienen las densidades del material (aparente y real), y su porosidad, tanto P_m (porosidad másica o capacidad de absorción de agua), como P_v , (porosidad abierta o proporción de poros accesibles), empleando las ecuaciones [3.3], [3.4], [3.5] y [3.6], respectivamente.

$$\rho_{aparente}(g/cm^3) = \frac{m_{seca}}{m_{sss} - m_{inm}} \cdot 0,998 \quad [3.3]$$

$$\rho_{real}(g/cm^3) = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{inm}} \cdot 0,998 \quad [3.4]$$

$$P_m(\%) = \frac{m_{sss} - m_{seca}}{m_{inm}} \cdot 100 \quad [3.5]$$

$$P_v(\%) = \frac{m_{sss} - m_{seca}}{m_{sss} - m_{inm}} \cdot 100 \quad [3.6]$$

Determinación de la permeabilidad al agua bajo presión

La determinación de la permeabilidad al agua bajo presión se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de Construcción de la UPC. En la Figura 3.14 se presenta el procedimiento a seguir, tal y como especifica la norma UNE-EN 12390-8 (AENOR, 2009c).

El ensayo tiene una duración de 72 horas, durante las cuales, la probeta se ve sometida a una presión de agua de 500 kPa sobre su cara inferior, que previamente debe

¹ A partir de 70° C puede producirse la descomposición de la etringita, y sucesivamente se produce la eliminación de agua del gel CSH, influyendo en la medida de porosidad

haber sido pulida. Una vez transcurrido dicho periodo, la probeta se parte diametralmente en seco, a fin de visualizar el frente de penetración. A partir de las fotografías tomadas, se determina la penetración máxima (P_{MAX}), el promedio (P_{MED}).

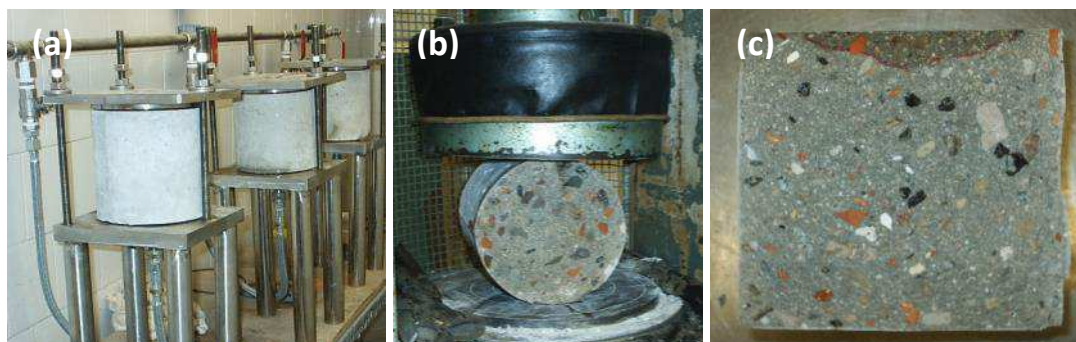


Figura 3.14. Determinación de la permeabilidad al agua bajo presión. a) Disposición general del ensayo, b) Corte diametral en seco (ensayo brasileño), c) Frente de penetración

Determinación del contenido y orientación de fibras

Las propiedades ferromagnéticas de las fibras de acero incluidas en el hormigón han permitido desarrollar a investigadores de la UPC (Torrents *et al.* 2012), un método práctico para obtener el contenido y la orientación de las fibras presentes en el hormigón. En dicho estudio, se concluyó que el contenido de fibras de acero presente en una probeta de hormigón, altera de forma proporcional el campo magnético existente alrededor de la probeta. Esta variación del campo magnético se manifiesta a partir de un incremento de la inductancia (ΔL).

El equipo de medida de inductancia emplea una bobina discontinua, la cual genera un campo magnético uniforme en el interior de la celda de medida (cúbica de 150 mm de lado), con un error en las lecturas inferior al 5 %. El equipo empleado para realizar las medidas es un analizador de impedancias HP-4192A y el procedimiento de ensayo seguido se describe a continuación.

- Reset del sistema, situando la celda de medida sobre una superficie no conductiva (vidrio, plástico o madera), de tal modo que la variación de inductancia medida por el equipo sea nula (ver Figura 3.15a).
- Introducción de la probeta en la celda de medida, anotando el valor de ΔL según la dirección de hormigonado, denominado eje 1 de la probeta (Figura 3.15b).
- Medición del valor de ΔL en los otros dos ejes de la probeta, ejes 2 y 3 respectivamente.

Dado que el campo magnético generado, y consecuentemente la lectura de impedancia (ΔL), depende del tipo de fibra y de la bobina empleada (cúbica o cilíndrica), debe realizarse una calibración del método. Esta consiste en determinar de forma manual,

y una vez realizada la lectura con el equipo de medida, el contenido exacto de fibras en la muestra. Para ello, se introduce la probeta en un machacador de mandíbulas tantas veces como sea necesario, hasta que las fibras se desprenden del hormigón. Finalmente, se recogen por medio de un imán y se anota el peso total de fibras. Los detalles de la calibración del método inductivo se presentan en el ANEJO B.

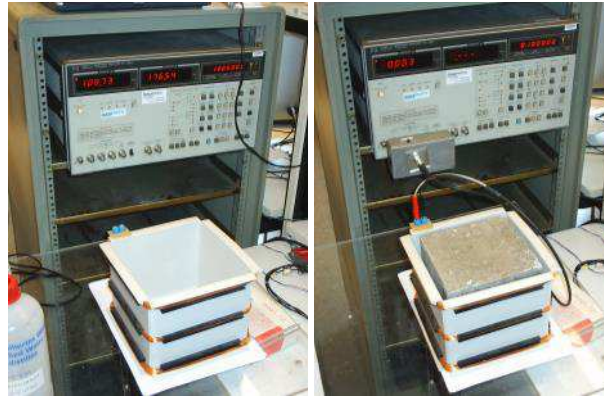


Figura 3.15. Determinación del contenido y orientación de fibras mediante el método inductivo: a) Reset del sistema, b) medida del valor de ΔL en el eje 1.

3.6 MEMORIA 3ª CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.6.1 Extracción de bataches

Cuando la excavación en obra avanzó hasta alcanzar cotas más profundas, los seis elementos ejecutados durante la prueba piloto fueron retirados para favorecer la movilidad. Aprovechando esta circunstancia, en lugar de ser trasladados a vertedero, se conservaron para posteriormente realizar estudios sobre el elemento estructural “a escala real”. Durante el mes de julio de 2012, fueron transportados hasta los terrenos que la empresa *Gestora de Runes del Llobregat S.A* posee en el puerto de Barcelona. Por las circunstancias limitantes del traslado (dimensiones excesivas), los seis bataches tuvieron que cortarse longitudinalmente en dos mitades, tal y como muestra la Figura 3.16. De modo que se obtuvieron doce piezas de dimensiones aproximadas de 2,5 x 1,75 x 0,6 m.

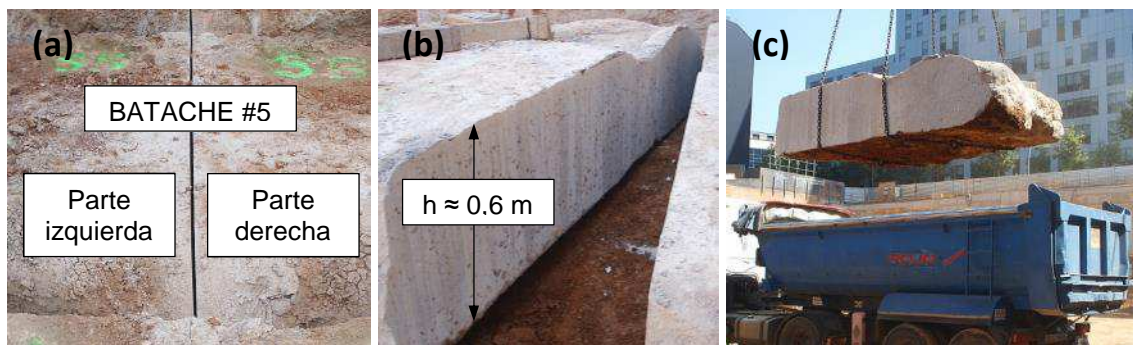


Figura 3.16. a) y b) Corte aplicado, c) Manipulación y transporte

3.6.2 Plan de corte. Testigos y placas

Aprovechando que de cada elemento ejecutado se disponían de dos piezas de dimensiones similares, se planificaron dos líneas de investigación diferentes (descritas a continuación), una para cada una de ellas:

- La **obtención de probetas-testigo** mediante la extracción de testigos (cilíndricos, prismáticos y cúbicos), con el objetivo de analizar la variabilidad de las propiedades físicas y mecánicas en función de la cota z, y así poder detectar posibles anomalías derivadas del proceso de ejecución, tales como la segregación de áridos, acumulación de fibras o presencia de coqueras.
- La **obtención de losas** para el ensayo de las mismas, y analizar el comportamiento estructural a “escala real” del elemento, mediante la realización de un ensayo de flexión.

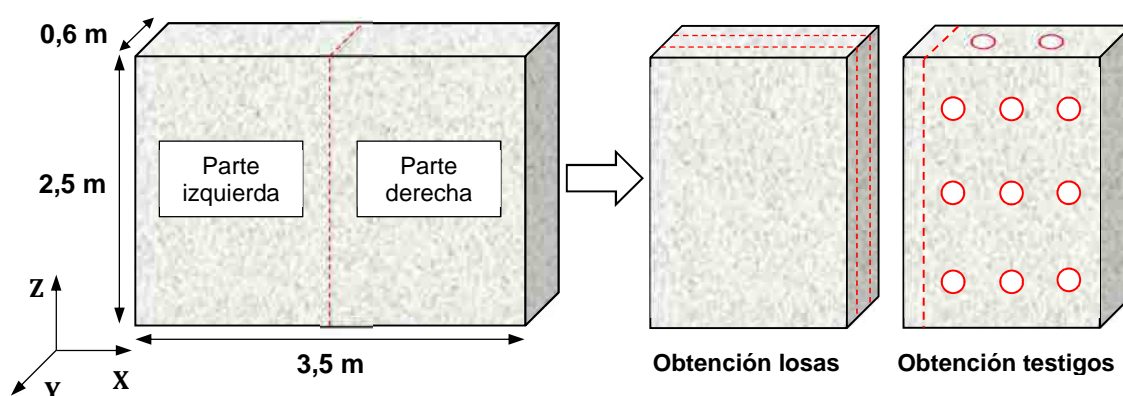


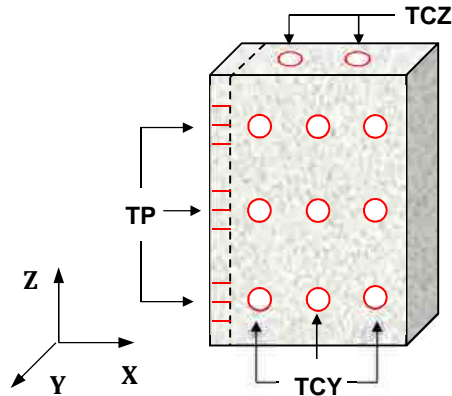
Figura 3.17. Esquema de corte de losatache

Obtención de probetas-testigo:

A mediados de octubre de 2012 se realizó la extracción de los testigos, siguiendo el plan de corte descrito a continuación. El número de testigos obtenidos para cada batache, agrupados según su tipología, se detalla en la Figura 3.18.

- Corte longitudinal con sierra de disco a una distancia de 15 cm de la superficie lateral plana. Obtención de una placa de hormigón de 15 x 60 x H cm.
- Obtención de 6 testigos prismáticos (de ahora en adelante, TP), agrupados de dos en dos, realizando nueve cortes sobre la placa obtenida anteriormente.
- Extracción de dos testigos cilíndricos longitudinales (de ahora en adelante, TCZ), de 92 mm de diámetro y longitud igual a la altura del batache L (220 – 250 cm).

- Extracción de nueve testigos cilíndricos transversales (de ahora en adelante, TCY), de 92 m de diámetro y longitud igual al grosor del batache H (60 cm).



Testigos extraídos (por batache)

- 9 testigos cilíndricos transversales (TCY)
Ø92 mm x H ≈ Ø92 mm x 600 mm
- 2 testigos cilíndricos longitudinales (TCZ)
Ø92 mm x L ≈ Ø92 mm x 2500 mm
- 6 testigos prismáticos (TP)
150 mm x 150 mm x 600 mm

Figura 3.18. Número y tipo de testigo extraídos (por batache)

En ella se aprecian las tres tipologías de testigos a extraer de cada pieza. Por un lado, se han obtenido seis TP (150 x 150 x 600 mm), agrupados de dos en dos, a tres niveles de cota. La longitud de los dos TCZ es variable, dependiendo de las dimensiones del batache, y oscila desde los 2,2 a los 3 metros. Finalmente, se extrajeron nueve testigos TCY, de 60 cm de longitud, agrupados formando una cuadrícula de tres por tres. El diámetro de los testigos cilíndricos, tanto de los TCZ como de los TCY varía entre los 90 y los 95 mm, debido a la broca de perforación utilizada.

Un aspecto básico durante este proceso, debido al elevado número de testigos con los que se tiene que trabajar (superior a 350), es el criterio adoptado para su identificación, que debe perdurar durante el proceso de extracción, almacenamiento y ensayo en el LTE Luís Agulló. El marcado e identificación de los testigos durante las tareas de extracción se llevó a cabo mediante el uso de aerosoles de tres colores diferentes. En función de su cota respecto al nivel del terreno, se identificaron en color rojo los más superficiales, en color azul los intermedios y en color verde los situados a mayor profundidad.

➤ Obtención testigos prismáticos (TP)

En primer lugar se realizó un corte longitudinal a 15 cm de distancia del borde plano, mediante una sierra de disco (Figura 3.19a), con ello se aprovecha el corte realizado previamente en obra, para obtener una pieza con dos caras planas y paralelas de grosor 15 cm (Figura 3.19b). Finalmente se extrajeron los TP de 15 x 15 x 60 cm, realizando nueve cortes sobre la pieza obtenida anteriormente (Figura 3.19c).

Sin embargo, los TP obtenidos de este procedimiento no fueron los previstos, presentando irregularidades, tanto de dimensiones como de no paralelismo entre caras,

hecho que ha alterado sensiblemente los resultados e imposibilitado el ensayo de alguno de ellos.



Figura 3.19. Obtención de los testigos prismáticos (TP)

➤ Extracción de testigos cilíndricos: longitudinales (TCZ) y transversales (TCY)

Para la extracción de los TCZ y TCY, se emplearon las metodologías mostradas en las imágenes de la Figura 3.20. Tal y como se aprecia en la Figura 3.20a, los testigos TCY se distribuían siguiendo una cuadrícula de 3 x 3, de tal modo que pueda realizarse una extrapolación entre los resultados correspondientes a las probetas-testigo situados a una misma cota (superficial, intermedia y profunda).



Figura 3.20. a) Cuadrícula TCY, b) Extracción TCZ, c) Extracción TCY, d) Testigos extraídos

Conforme los testigos se iban extrayendo, éstos se marcaban siguiendo el criterio descrito posteriormente (Figura 3.20d). Si bien mayoritariamente se pudo completar el proceso garantizando su integridad, en algunos casos resultó imposible debido a fisuras generadas durante el proceso de corte. Además, los testigos TCZ (de longitudes superiores a 2,5 metros), tuvieron que fraccionarse de forma controlada para poderlos trasladar hasta el LTE Luis Agulló.

Obtención de placas

La obtención de las placas requirió de un tratamiento más complejo por lo se transportaron hasta las instalaciones de la empresa COMETEC, en St. Vicenç de Castellet

(Barcelona). Sobre cada pieza, se realizaron dos cortes longitudinales, tal y como muestra la Figura 3.21, utilizando para ello la técnica de corte con hilo diamantado.

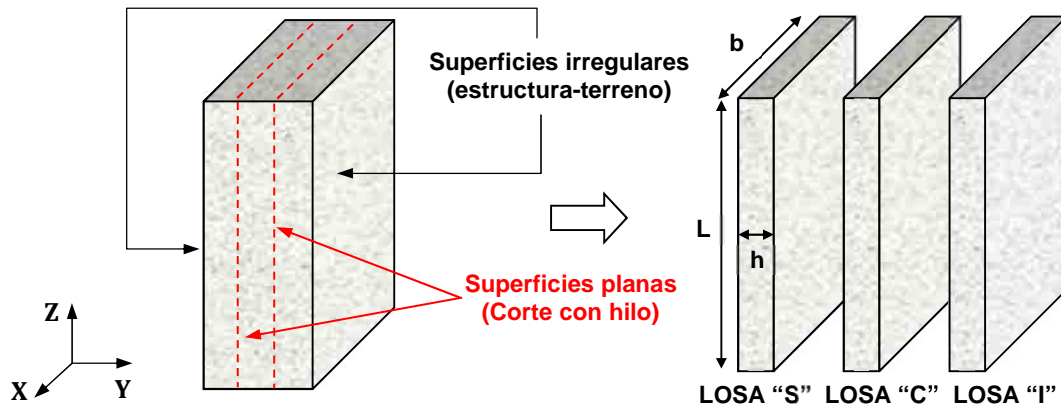


Figura 3.21. Obtención de placas

La principal ventaja que ofrece esta técnica respecto al corte con disco (Figura 3.19a) es su versatilidad, dado que puede cortarse casi cualquier espesor y geometría. El sistema consiste en hacer pasar el hilo por la superficie a cortar, guiándolo por medio de una serie de poleas (poleas guía) y tirando de él con una polea motriz accionada por un cabezal hidráulico que va retrocediendo a lo largo de una guía.

Por tanto, de cada pieza se han obtenido tres losas de aproximadamente 20 cm. La identificación de cada una de ellas se hizo en función de su disposición, marcándose con la letra "S" la losa superior, con "C" la losa central y con una "I" la losa inferior, tal y como se muestra en la Figura 3.22a. Una vez realizados los trabajos de corte, las losas se trasladaron en camión hasta el LTE Lluís Agulló (Figura 3.22b), donde se llevarían a cabo los ensayos de flexión.



Figura 3.22. a) Marcaje del batache, b) Traslado de las placas hasta el LTE (Batache 5)

Un aspecto que tendrá especial importancia en la metodología seguida durante el proceso de preparación y montaje del ensayo de flexión es la irregularidad de las superficies. Hay que remarcar que únicamente una de las tres losas obtenidas por batache (la losa central "C") posee ambas superficies completamente planas.

3.6.3 Plan de ensayos: probetas-testigo extraídas de los batches

Del plan de corte descrito en el apartado anterior, y del posterior fraccionamiento realizado, se obtuvieron un total de 385 testigos, distribuidos de la siguiente forma: 187 TCZ, 162 TCY y 36 TP. En la Tabla 3.11 se detalla el plan de ensayos previsto, detallando las propiedades analizadas para cada tipología de testigo, la norma o metodología seguida para su obtención, así como el número de muestras ensayadas:

Tipo de testigo	Propiedad	Norma/Método	# muestras
TCZ	Módulo de elasticidad	UNE 83316:1996	72
	Res. a compresión	UNE-EN 12390-3:2009	72
	Porosidad – Densidad	UNE-EN 1936:2007	82
	Vel. Ultrasonidos	-	117
	Contenido y orientación de fibras de acero	Mét. Inductivo modificado (Cavalaro <i>et al.</i> 2015)	32
	Tenacidad Res. fisuración y residual	UNE 83515:2010 modificado	32
TCY	Penetración de cloruros	-	51
	Expansión por sulfatos	-	42
	Porosidad - Densidad	UNE-EN 1936:2007	72
	Vel. Ultrasonidos	-	154
TP	Res. a flexotracción	UNE-EN 14651:2007	18
	Contenido y orientación de fibras de acero	Método Inductivo (Torrents <i>et al.</i> 2013)	19+14+13
	Tenacidad Res. fisuración y residual	Pujadas <i>et al.</i> (2014)	19+14+13

Tabla 3.11. Normas y metodologías seguidas

TCZ

La campaña se inició con la determinación del peso, dimensiones y velocidad del pulso ultrasónico, de todos los testigos cilíndricos. De este modo se comprobó que, debido al taladro empleado para su extracción (Figura 3.20b), el diámetro de éstos era de 92 - 95 mm, inferior a los 100 mm que establecen las normativas. Para no alterar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, teniendo que aplicar coeficientes correctores (Price, 1951), se optó por mantener una relación geométrica longitud – diámetro (L/d), próxima a 2,0, de forma que la longitud de las probetas testigo ensayadas oscila entre los 180 y los 200 mm.

Para los ensayos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad sobre los testigos, se siguió el mismo procedimiento que con las probetas moldeadas en planta (descrito anteriormente en el apartado 3.5.3), utilizando la pulidora y la prensa IBERTEST

del LTE Luis Agulló. En cambio, para la determinación del contenido de fibras y la resistencia residual, ha sido necesario emplear adaptaciones sobre las metodologías ya existentes, dada la geometría no estandarizada de las probetas testigo.

Por un lado, para la determinación del contenido y orientación de fibras, el procedimiento de ensayo original fue concebido para probetas cúbicas de 150 mm de lado utilizando para ello una bobina cúbica, tal y como se ha mostrado con anterioridad en la Figura 3.15. Sin embargo, una investigación reciente realizada por Cavalaro *et al.* (2015), ha permitido adaptar la metodología a probetas cilíndricas. Aprovechando esta innovación, ha podido determinarse el contenido de fibras utilizando los testigos cilíndricos obtenidos de la fragmentación de los TCZ.

Del mismo modo, el ensayo Barcelona original (AENOR, 2010) requiere de probetas cilíndricas de 150 x 150 mm para determinar la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual de HRF. Adaptando la formulación existente y empleando una instrumentación adecuada, han podido determinarse dichos parámetros ensayando testigos más reducidos, cilíndricos de 90 x 90 mm (Figura 3.23).

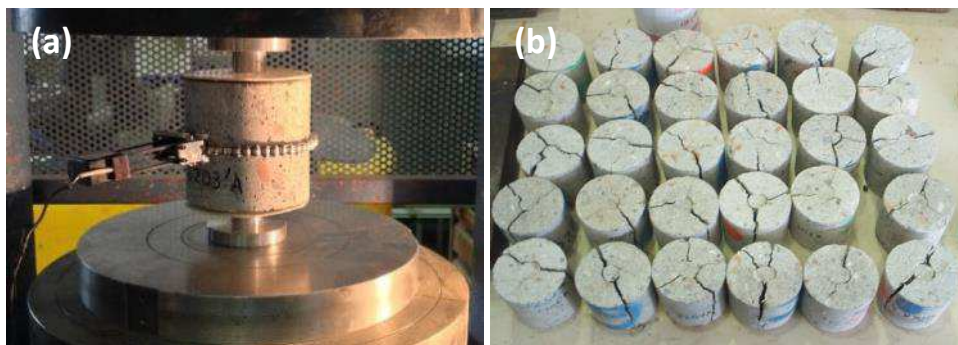


Figura 3.23. a) UNE 83515:2010 (adaptado), b) Probetas testigo ensayadas

La flexibilidad de la norma UNE-EN 1936 (AENOR, 2007) en lo relativo a las dimensiones de la muestra a ensayar (únicamente exigiendo un volumen mínimo de 60 ml y una relación superficie - volumen comprendida entre 0,08 y 0,20 mm⁻¹), ha permitido destinar un gran número de testigos para la determinación de la densidad y porosidad, evaluando su variabilidad a diferentes cotas del batache.

TCY

Uno de los mayores inconvenientes que se presuponen a los hormigones dotados con árido reciclado mixto es su vulnerabilidad en aspectos relativos a su durabilidad. Para analizar esta cuestión se han empleado los testigos cilíndricos transversales (TCY) extraídos de cada uno de los seis bataches ejecutados. En particular, se ha querido analizar la resistencia de los hormigones frente a dos ataques muy habituales de origen químico: penetración de cloruros y expansiones por reacción sulfática (interna).

El ensayo de penetración de cloruros se ha basado en la metodología expuesta por Baroghel-Bouny *et al.* (2007), realizando una serie de modificaciones para adaptarla a nuestro contexto. De cada batache se han destinado 3 TCY, que posteriormente se han fragmentado en 3 probetas de 200 mm de longitud. Por tanto, el número total de muestras ensayadas asciende a 54 (9 por batache).

Antes de iniciar el ensayo se aplicó un tratamiento superficial con resina epoxy sobre cada testigo (Figura 3.24a), dejando únicamente una cara sin protección, a través de la cual debían penetrar los cloruros. Una vez endurecida la resina (Figura 3.24b), los testigos se sumergieron en una disolución de agua destilada con una concentración de 165 g/l de cloruro sódico (NaCl), durante un periodo de 205 días (Figura 3.24c). Para asegurar unas condiciones estables, cada 35 días se reemplazaba la disolución.



Figura 3.24. a) Aplicación resina epoxy, b) Aspecto testigo, c) Configuración del ensayo

La evaluación del frente de penetración de cloruros se ha realizado a tres edades distintas: 62 (03-10-2013), 95 (05-11-2013) y 205 (25-02-2014) días. Para su visualización, el testigo se ha fragmentado diametralmente en seco, y a continuación, se ha aplicado una solución de nitrato de plata (AgNO_3), concentración 0.1M, sobre la superficie a analizar, produciéndose la siguiente reacción donde hay presencia de cloruros.

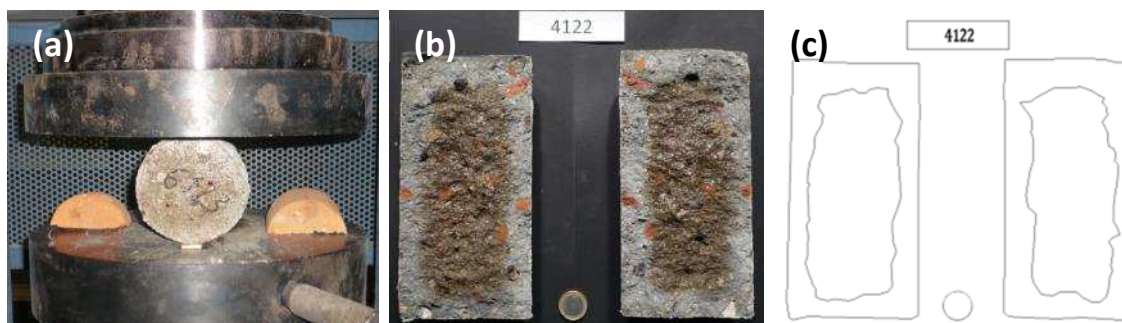
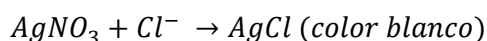


Figura 3.25. a) Carga diametral, b) Frente penetración, c) Imagen digitalizada

Para determinar las posibles expansiones debidas a los sulfatos internos presentes en el yeso de los áridos reciclados, se han empleado 42 muestras obtenidas del despiece

de los TCY. Estas muestras han estado sumergidas en agua destilada durante 187 días en un contenedor debidamente protegido durante el transcurso del ensayo (Figura 3.26a). Periódicamente, con ayuda de un reloj comparador digital (Figura 3.26b), se han registrado los cambios volumétricos producidos en las muestras, tomando como referencia dos puntos de lectura separados entre sí una distancia de 150 mm. Estos puntos, se adherieron a la probeta, de forma previa al inicio del ensayo, por medio del adhesivo de dos componentes X60.

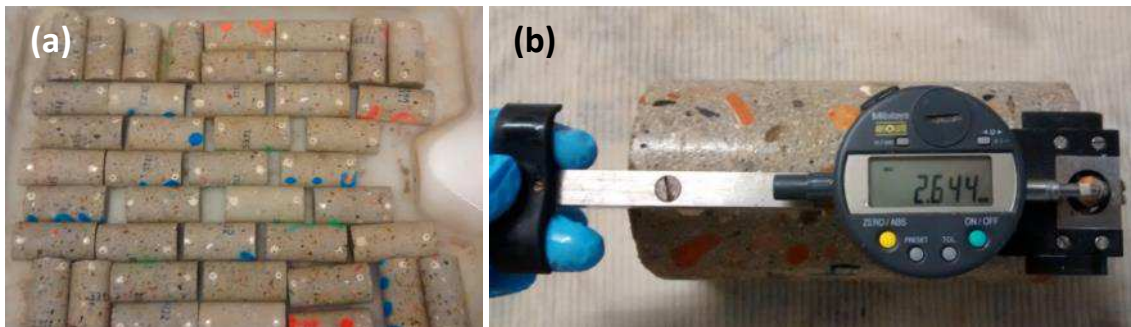


Figura 3.26. a) Inmersión de probetas en agua, b) Toma de lecturas con reloj comparador

TP

El plan de ensayos realizado con los testigos prismáticos consta de tres fases. En primer lugar, se ha determinado la resistencia a flexotracción y residual, según la norma UNE-EN 14651 (AENOR, 2007b). Una vez ensayados, dependiendo de la geometría del TP original, y la trayectoria de la fisura producida durante dicho ensayo, pudieron extraerse entre 2 y 4 testigos cúbicos de cada testigo.

Con dichos testigos cúbicos, ha podido determinarse el contenido y orientación de las fibras en cada uno de ellos, aplicando el método inductivo. Finalmente, las probetas fueron sometidas al ensayo Barcelona (Pujadas, 2013), a fin de comparar los resultados de resistencia y tenacidad obtenidos de este método, respecto los del ensayo UNE-EN 14651.

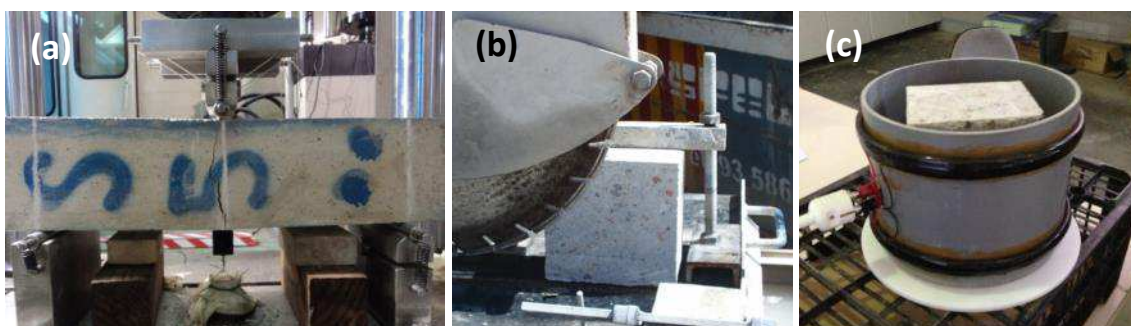


Figura 3.27. a) Ensayo UNE-EN 14651:2007, b) Corte testigos, c) Método Inductivo

3.6.4 Ensayo de losas

Los elementos a ensayar son 18 losas de geometría variable, 3 por cada batache ejecutado durante el tramo de prueba. Éstas se obtuvieron a partir del plan de corte mostrado anteriormente en la Figura 3.21. Nueve de las losas eran de HRF (las correspondientes a los bataches 2, 5 y 6), mientras que las nueve restantes eran de hormigón en masa (bataches 1, 3 y 4).

La configuración del ensayo realizado es de viga-losa biapoyada sometida a un cuchillo de carga actuando sobre la sección centro luz. La carga, aplicada mediante un pistón hidráulico, se ha distribuido en todo el ancho de la losa, mediante una viga de reparto (perfil HEB) de 2 metros de longitud y 30 cm de ancho. La campaña se ha llevado a cabo en dos fases, detalladas a continuación, debido al limitado espacio de acopio disponible en las instalaciones del LTE Luís Agulló.

- **1ª Fase:** realizada durante los meses de noviembre y diciembre de 2012, durante la cual se ensayaron las nueve losas pertenecientes a los bataches 2, 5 y 6.
- **2ª Fase:** realizada durante el mes de enero de 2013, durante la cual se ensayaron las nueve losas restantes, pertenecientes a los bataches 1, 3 y 4.

Las losas se almacenaron en dos acopios, colocadas una sobre otra (hasta un máximo de 5 niveles), y situando entre ellas dos listones de madera, tal y como se muestra en la Figura 3.28. Con esta disposición, se evita que se generen tensiones excesivas en las losas durante su almacenamiento, ya que la carga debida al peso propio se transmite directamente, a través de los listones, al terreno.

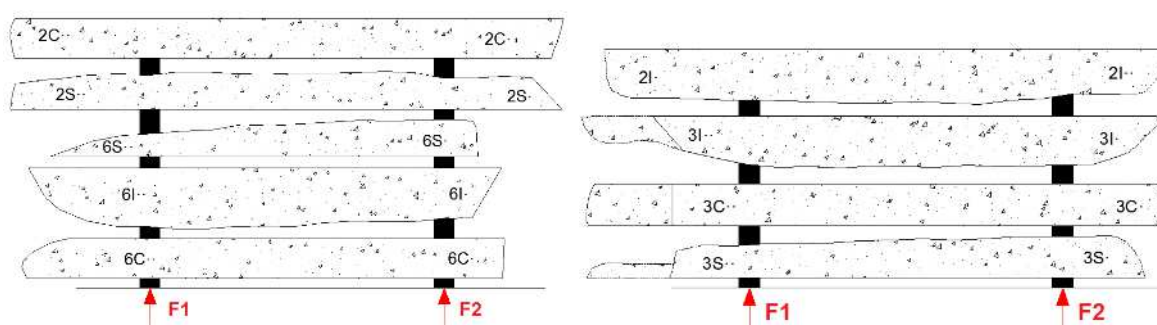


Figura 3.28. Acopio de lasas (1ª Fase)

Replanteo de las losas

Una vez acopiadas las losas se realizaron las tareas de replanteo, a fin de obtener su geometría. En base a los datos de espesor (h) y anchura (b), obtenidos cada 15 cm, se adoptaron las consideraciones oportunas para el ensayo de flexión, tales como: la distancia entre apoyos (detalladas en la Tabla 3.12), la superestructura auxiliar necesaria y la disposición de la instrumentación (LVDT's).

Batache	Losas	Luz (m)
1 - 3 - 4 - 5	1I, 1C, 1S, 3I, 3C, 3S, 4I, 4C, 4S, 5I, 5C, 5S	1,90
6	6I, 6C, 6S	1,60
2	2I, 2C, 2S	1,40

Tabla 3.12. Distancia entre apoyos

Esta disparidad se debe a varios motivos. Por un lado, las losas correspondientes al batache #2 ven reducida su luz de ensayo a 1,40 m, debido a la rotura de una esquina, tal y como se muestra en la Figura 3.29a, producida durante el traslado desde la obra. En el batache #6, la luz de ensayo se limita a 1,60 m por sus dimensiones inferiores a la del resto de bataches, en los cuales se adopta una luz de ensayo estándar e igual a 1,90 m.

Otro hecho que se constata durante el replanteo es la presencia de barras de acero Ø16 (Figura 3.29b), no previstas inicialmente, en catorce de las losas: 1S, 2C, 2I, 2S, 3C, 3I, 3S, 4C, 4I, 4S, 5S, 6C, 6I y 6S. Para minimizar su influencia sobre los resultados del ensayo de flexión, en aquellos casos en que fuera posible, se optó por colocar la losa de forma que la barra quedara lo más alejada posible respecto a la fibra inferior de la sección.

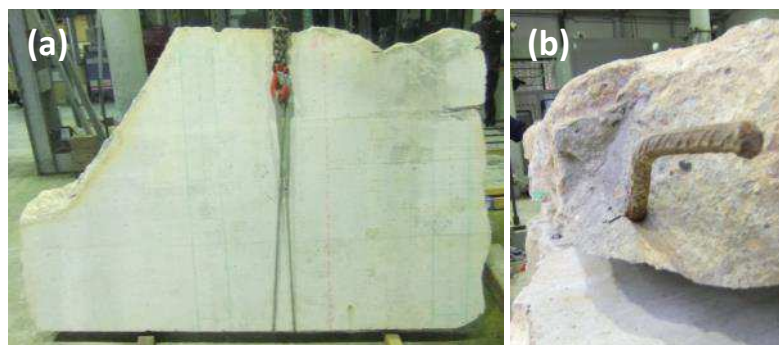


Figura 3.29. a) Geometría Losa 2C, b) Barra de acero Ø16

Colocación (y volteo) de la losa

El traslado de la losa desde el acopio hasta los caballetes de apoyo, necesitó del puente grúa (con capacidad de 5 toneladas), una cadena, dos eslingas y una carretilla elevadora. En función de cómo se habían acopiado las losas (véase la Figura 3.28) y/o de la disposición de las barras de acero, en las losas 2C, 2I, 3I, 4C, 5I y 6I, fue necesario realizar una maniobra de volteo. Para ello se recolocaron las eslingas y la cadena, y con ayuda de dos tableros de madera, que fueron utilizados como pivotes, se procedió tal y como detalla la secuencia de imágenes de la Figura 3.30.

Una vez la losa estaba correctamente orientada, con la superficie regular abajo, era recogida por la carretilla elevadora (Figura 3.31a) y depositada sobre los caballetes de apoyo.

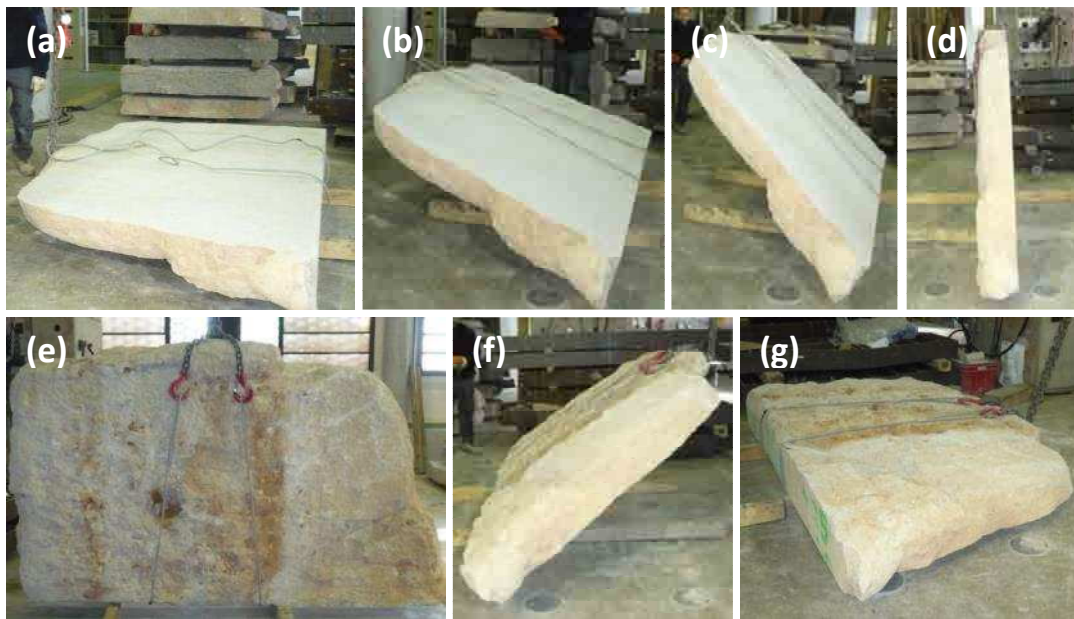


Figura 3.30. Secuencia de la maniobra de volteo de la losa 5I

Montaje de la superestructura – instrumentación

Los apoyos utilizados han sido dos caballetes metálicos de 1,50 m de longitud, unidos entre sí con dos chapas de acero para evitar movimientos relativos (Figura 3.31b). Para asegurar un contacto uniforme entre losa y caballete, se han colocado sobre estos dos neoprenos de 20 cm de anchura y 1,50 m de longitud (Figura 3.31c).

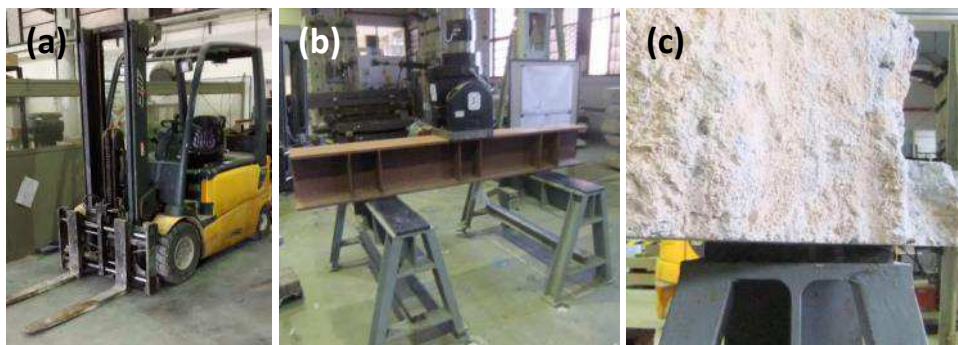


Figura 3.31. a) Carretilla elevadora, b) Viga de reparto y caballetes de apoyo, c) Neopreno

Para registrar los desplazamientos verticales sufridos por la losa, y la evolución de la(s) fisura(s) producida(s) durante el ensayo, se han empleado 14 transductores de desplazamientos (LVDTs). De éstos, 12 se han instalado sobre una superestructura aporticada de aluminio, tal y como se esquematiza la Figura 3.32, mientras que los 2 LVDTs restantes se han adherido en los paramentos laterales de la placa.

La posición de los LDVTs suspendidos de la estructura auxiliar ha variado en función de la luz del ensayo, tal y como se detalla en la Tabla 3.13. Para dotar de rigidez

lateral a la superestructura, se colocaron dos barras transversales y pesos muertos en las cuatro esquinas. De este modo, se evitan posibles movimientos que pudieran alterar los registros efectuados por los LVDT's.

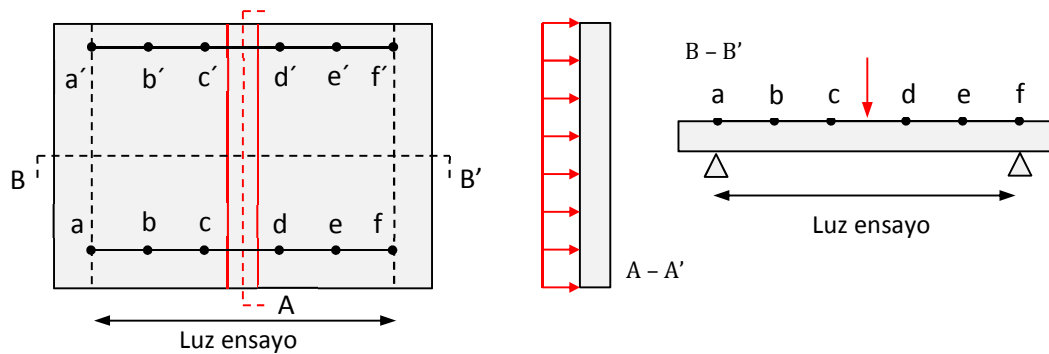


Figura 3.32. Disposición de los LVDT's sobre la superestructura

Batache	Luz (m)	Distancia respecto apoyo 0 (m)					
		a	b	c	d	e	f
1 - 3 - 4 - 5	1,90	0	0,35	0,70	1,20	1,55	1,90
2	1,40	0	0,25	0,50	0,90	1,15	1,40
6	1,60	0	0,30	0,60	1,00	1,30	1,60

Tabla 3.13. Colocación de los LVDT's (distancia del LVDT correspondiente al apoyo A)

Para la colocación de los dos LVDTs encargados de registrar la abertura de fisura (Figura 3.33b), fue necesario emplear el pegamento de dos componentes X60, para adherirlos al paramento lateral de la losa. Tras esto, se comprobó que el registro de datos se efectuaba correctamente, moviendo manualmente los LVDTs un desplazamiento predeterminado, y verificando que el registrado coincidía con el realmente realizado.

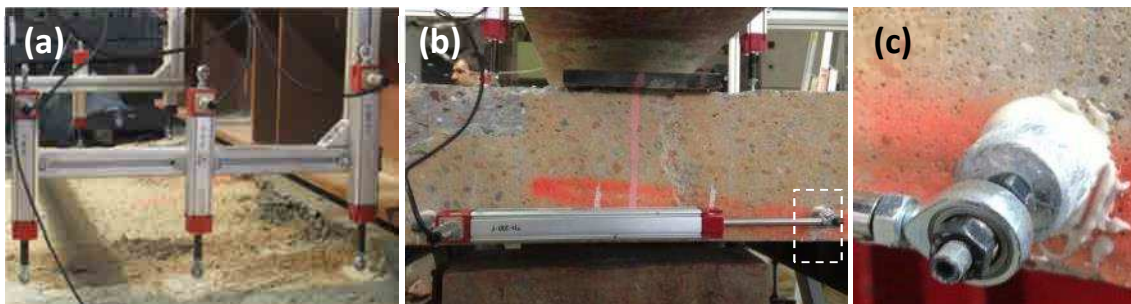


Figura 3.33. a) y b) Colocación de LVDTs, c) Detalle adhesivo X60

Regularización de la superficie

Para que la carga aplicada se transmitiera de forma uniforme y homogénea en todo el ancho de las losas "S" e "I", además de colocar un neopreno, fue necesario verter una

capa de mortero sobre la sección centro luz (Figura 3.34a). La dosificación empleada (en volumen) fue: 1 parte de cemento por 3 de agua y 5 de arena, y su espesor vino condicionado por la pendiente de cada placa en sentido transversal. Con el mortero todavía en estado fresco, se compactaba y nivelaba aplicando una ligera carga (~ 1 kN), para eliminar las irregularidades existentes.

Este tratamiento se realizó en doce de las losas ensayadas (todas excepto las losas "C"), debido a su irregularidad superficial. Excepcionalmente tuvo que aplicarse un tratamiento similar sobre la losa 4C, debido a una barra de acero situada justamente en el plano de corte entre las losas 4C y 4I. Ésta provocó que la superficie obtenida con el hilo diamantado no fuera regular. Para corregir el escalón presente, se optó por verter arena (Figura 3.34b), en lugar de mortero, sobre la superficie de contacto entre la viga de reparto y la losa.

Otra incidencia que provocó la misma barra de acero, se manifestó en la losa 4I. A causa del escalón existente, el contacto entre los apoyos y la losa no era el adecuado (ni siquiera solventado con los neoprenos). La solución adoptada consistió en verter mortero sobre ambos caballetes, dejando que fuera la propia losa con su propio peso la que asentara correctamente (Figura 3.34c).

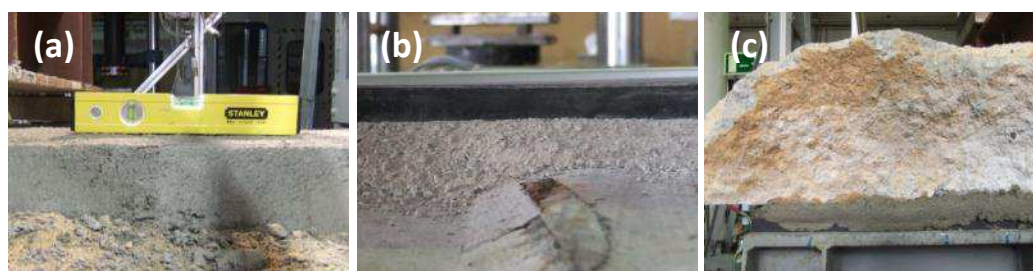


Figura 3.34. a) Mortero nivelante, b) Lecho de arena nivelante, c) Mortero apoyo - losa

La irregularidad superficial presente en las losas "S" e "I", hizo necesario realizar otro tratamiento de regularización, esta vez en aquellos puntos donde debían colocarse los LVDT's. En una primera fase, se llevó a cabo con medios mecánicos, y en una segunda fase, manualmente, con martillo y escoplo. Con la superficie ya tratada, se colocaron placas de metacrilato de 15 x 15 mm, sobre las que se apoyaron los aparatos de medida.

Set-up del ensayo

Una vez realizadas todas las tareas de preparación descritas anteriormente, el ensayo podía comenzar (Figura 3.35). En primer lugar, se aplicaba una precarga inicial de entre 3 y 5 kN, para verificar que la carga se distribuyera correctamente en todo el ancho de la losa. Llegado este punto, se establecía un control del ensayo por desplazamiento, constante e igual a 0,25 mm/min, tal y como muestra en la Figura 3.36a.



Figura 3.35. Configuración del ensayo. Losa 4S (Luz: 1,90m)

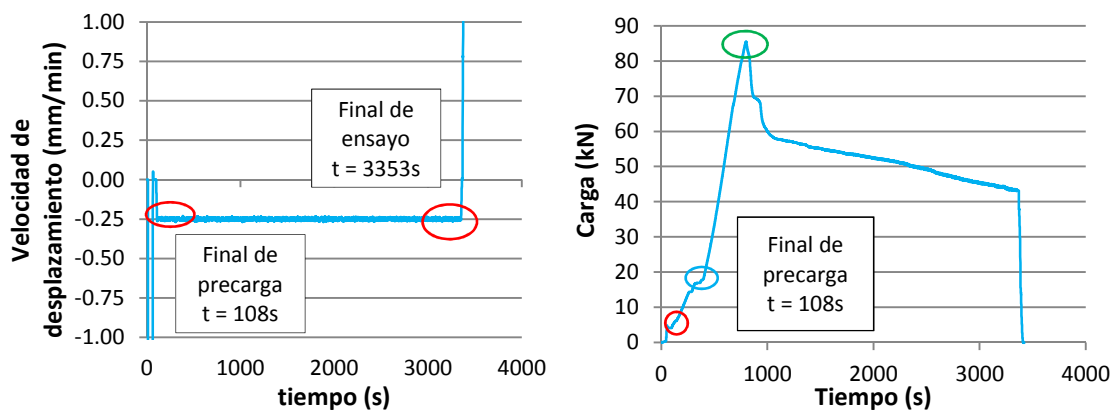


Figura 3.36. a) Velocidad de carga del ensayo, b) Diagrama Carga (kN) – tiempo (s)

Tal y como se muestra en la Figura 3.36b, la primera parte del ensayo viene condicionada por la mayor deformabilidad de los neoprenos (tanto del situado entre la viga de reparto de la carga y la losa, como de los situados en los apoyos), lo que repercute en una menor velocidad de carga. Una vez superados los 15-20 kN, la carga se incrementa a mayor velocidad hasta el momento en que se produce la fisuración de la losa.

En caso de que la losa estuviera reforzada con fibras, éstas cosían la fisura y permitían mantener una cierta resistencia residual, continuando el ensayo hasta que la abertura de fisura alcanza los 5 mm. En caso que no tuviera refuerzo alguno (fibras o barras $\varnothing 16$), se producía una rotura frágil y se daba por finalizado el ensayo.

3.6.5 Post - ensayo.

Para describir y analizar el comportamiento de los elementos ensayados, una vez finalizado el ensayo y asegurada la estabilidad de la losa, se realizó un registro de las fisuras generadas (Figura 3.37a-b). Por último, se desmontaba la superestructura, se retiraba las losa y se acopiaba hasta su retirada del laboratorio (Figura 3.37c-d).

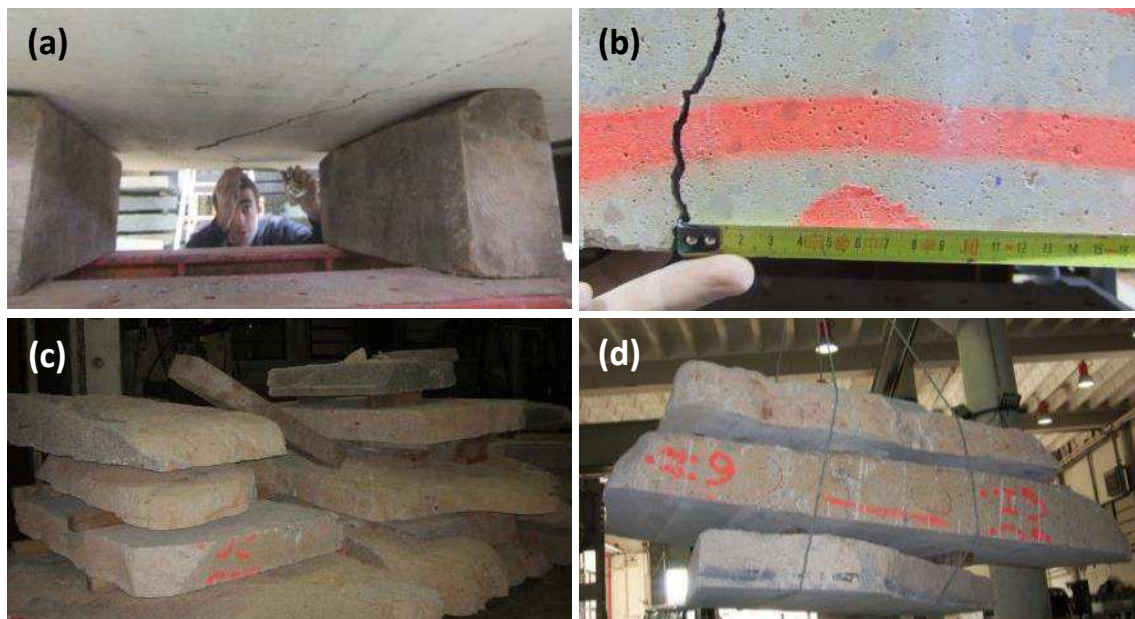


Figura 3.37. a) y b) Registro de fisuras; c) Acopio y d) retirada de losas ensayadas

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS TESTIGOS Y PROBETAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Tras describir en el capítulo anterior las campañas experimentales desarrolladas, el **objetivo** del presente es analizar los resultados obtenidos durante las mismas. Debido al elevado número de ensayos llevados a cabo, en este capítulo únicamente se muestran los resultados pertenecientes a la caracterización físico-mecánica de probetas y testigos, dejando para capítulos posteriores aquéllos pertenecientes al ensayo de placa (Capítulo 5) y los relativos a la durabilidad del hormigón (Capítulo 6).

El análisis se ha realizado especificando la procedencia del elemento ensayado, ya sea probeta moldeada en planta (1ª campaña), probeta moldeada en el LTE Luis Agulló (2ª campaña) o probeta-testigo extraída de los bataches (prueba piloto).

Con este procedimiento se pretende facilitar el análisis, pudiendo estudiar la influencia que ejercen, sobre los resultados obtenidos, aspectos como el proceso de fabricación: comparando 1ª y 2ª campaña; o el transporte y puesta en obra: comparando 1ª campaña y prueba piloto. Cabe recordar que los hormigones con los que se ejecutaron las pantallas de sostenimiento pertenecientes a la prueba piloto, fueron los empleados en el llenado de las probetas en planta.

En la Tabla 4.1 se presenta la correspondencia entre las siete dosificaciones realizadas durante la campaña en planta y los bataches que fueron ejecutados con éstas. Los hormigones se agrupan en tres tipologías: hormigón en masa (HM), hormigón en masa con árido reciclado (HRM) u hormigón con árido reciclado reforzado con fibras (HRF). Además, en la tabla se detalla que tipo de árido reciclado y fibra de acero se ha utilizado en cada dosificación, diferenciando entre los áridos reciclados 4/12 y 12/20 y las fibras de acero de 35 o 50 mm de longitud.

Dosificación (campaña en planta)		Materiales diferenciales	Batache (prueba piloto)
Hormigón en MASA (HM)	HM/AC12	Patrón	#3 (zona inferior)
Hormigón en MASA con ÁRIDO RECICLADO MIXTO (HRM)	HRM/AC12	Árido reciclado 4/12	#3 (zona superior)
	HRM/AC20	Árido reciclado 4/12 Árido reciclado 12/20	#1
	HRM/AC20+i	Árido reciclado 12/20 Inhibidor absorción	#4
Hormigón reforzado con FIBRAS de ACERO y ÁRIDO RECICLADO MIXTO (HRF)	HRF/AC12-35a	Árido reciclado 4/12 Fibras de acero de 35 mm	#5
	HRF/AC12-35b	Árido reciclado 4/12 Fibras de acero de 35 mm	#2
	HRF/AC20-50	Árido reciclado 4/12 Árido reciclado 12/20 Fibras de acero de 50 mm	#6

Tabla 4.1. Correspondencia entre dosificaciones (campaña en planta) y bataches ejecutados

Dado que la prueba piloto constaba de seis bataches de sostenimiento (referenciados como #1 a #6), y las dosificaciones fabricadas durante la campaña en planta fueron siete, se da la circunstancia que el batache #3 está compuesto por dos dosificaciones. Por un lado, la dosificación patrón HM/AC12, vertida en primer lugar, y que conforma su parte más profunda, y por otro, la dosificación HRM/AC12 (vertida posteriormente), que se sitúa en su tramo más superficial. El resto de elementos se ejecutaron únicamente con una dosificación.

Cabe recordar que, debido a las dificultades para satisfacer los requisitos de autocompactabilidad en planta, la dosificación HRF/AC12-35 tuvo que realizarse en dos ocasiones: HRF/AC12-35a (1ª Fase) y HRF/AC12-35b (2ª Fase), introduciendo pequeñas modificaciones en el esqueleto granular.

El capítulo se ha estructurado analizando la influencia que han ejercido las variables principales (enunciadas a continuación), que se introducen con el empleo del hormigón desarrollado, sobre las propiedades físicas y mecánicas del mismo.

- La utilización de árido reciclado mixto: comparando las dosificaciones HM y HRM (Apartado 4.2)

- La adición de fibras de acero: comparando las dosificaciones HRM y HRF (Apartado 4.3)
- El método de pre-saturación empleado durante su fabricación: comparando la dosificación HRM/AC20+I con la HRM/AC20. (Apartado 4.4)
- La influencia del procedimiento constructivo: comparando los resultados procedentes de las probetas moldeadas en planta respecto los correspondientes a los testigos extraídos de los batches. (Apartado 4.5)
- Decantación en altura: analizando propiedades del batche en función de la cota. (Apartado 4.6)

Para finalizar con esta introducción, y con el fin de mostrar el volumen de trabajo que conlleva las campañas experimentales realizadas, en la Tabla 4.2 se detallan las propiedades estudiadas, el número de probetas ensayadas, ya sean moldeadas o testigos, así como la normativa o referencia seguida. El total de ensayos realizados es de **1095** que refleja la ambición con la que se ha planteado el tema.

Parámetro	Norma	Nº de muestras ensayadas			
		Planta	LTE	Prueba piloto	Total
Extensión de flujo	UNE-EN 12350-8:2011	7	6	--	13
Peso específico	--	47	54	117	218
Densidad – Porosidad	UNE-EN 1936:2007	44	--	82	216
Vel. de ultrasonidos	--	--	--	117	117
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3:2007	47	54	107	208
Módulo de elasticidad	UNE 83316:1996	--	36	72	108
Resistencia a flexión	UNE-EN 12390-5:2009	18	--	--	18
Res. a flexotracción	UNE-EN 14651:2007	--	--	9	9
Prof. penetración de agua bajo presión	UNE-EN 12390-8:2011	6	--	--	6
Contenido y orientación de fibras	Método inductivo (Torrents <i>et al.</i> 2012)	8	10	78	96
Resistencia residual y tenacidad	UNE 83515:2010	--	10	76	86

Tabla 4.2. Elementos ensayados – campañas experimentales

4.2 INFLUENCIA DEL ÁRIDO RECICLADO MIXTO

La utilización de árido reciclado mixto en la fabricación de un hormigón, puede modificar tanto el comportamiento en fresco (trabajabilidad, etc.) como en estado endurecido (propiedades físicas y mecánicas). En el presente apartado, a partir de los resultados obtenidos durante las campañas experimentales, se cuantifica esa influencia,

incidiendo sobre las propiedades más afectadas y valorando las repercusiones que conlleva para su utilización con fines estructurales.

Para analizar la influencia de sustituir al 100 % la fracción gruesa de áridos naturales por reciclados mixtos, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos con la dosificación patrón HM/AC12 y las tres dosificaciones de hormigón en masa con árido reciclado: HRM/AC12, HRM/AC20 y HRM/AC20+I.

4.2.1 Estado fresco: consistencia del hormigón

En la Figura 4.1 se presenta la extensión de flujo de las campañas en planta y en el LTE Luis Agulló, para las dosificaciones HM/AC12, HRM/AC12 y HRM/AC20.

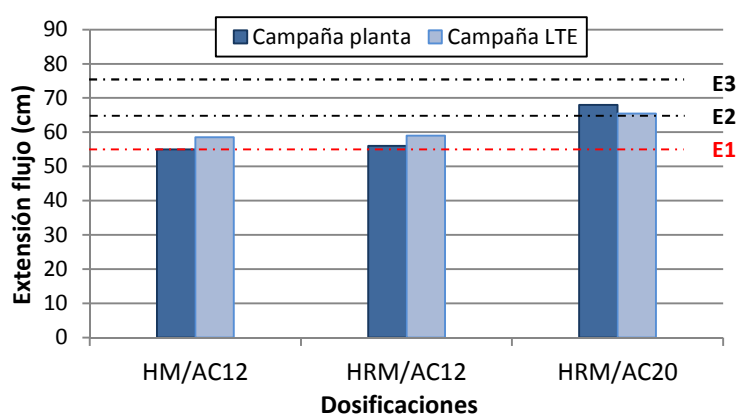


Figura 4.1. Consistencia de los hormigones. Influencia del uso de árido reciclado

En los tres casos analizados se supera el valor mínimo de 55 cm, exigido a los hormigones autocompactantes. Los valores dados en la Figura 4.1 se sitúan entre 55 y 68 cm, con una alta repetitividad de resultados en ambas campañas. Éstos resultados confirman que es factible conseguir consistencias similares sustituyendo el árido natural por áridos reciclados mixtos, siempre y cuando se presature el árido reciclado. Los valores de la extensión obtenidos se sitúan en el rango de hormigones autocompactante E1 y E2, según la nomenclatura utilizada en la EHE-08.

En la citada figura también se constata que, a igualdad de tamaño máximo (12 mm), la extensión de flujo obtenida es prácticamente la misma, independientemente del tipo de árido utilizado (natural o reciclado). Por otro lado, si se comparan las dos dosificaciones de HRM, aumentar el tamaño máximo de árido reciclado y pasar de 12 mm a 20 mm no se traduce en una pérdida de trabajabilidad. Las extensiones de flujo obtenidas, en ambas campañas experimentales, con la dosificación HRM/AC20 (65,5 y 65 cm) son mayores que las obtenidas con la dosificación HRM/AC12 (56 y 59 cm).

Este resultado puede entrar en contradicción con las recomendaciones relativas a limitar el tamaño máximo de árido en hormigones autocompactantes (Skarendahl y

Petersson, 2000; Okamura y Ouchi, 2003). Para dar respuesta a este comportamiento inusual entre la dosificación HRM/AC12 y HRM/AC20 deben considerarse los siguientes aspectos propios de los áridos reciclados utilizados:

1. La absorción a 24 h de ambos áridos era diferente (11,07 % para el árido de $t_{m\acute{a}x}$ de 12 mm y 7,30 % para el de $t_{m\acute{a}x}$ de 20 mm), si bien durante la campaña en planta se estimaron iguales, lo que representa una mayor cantidad de agua libre para la dosificación HRM/AC20.
2. La cinética de absorción del agua depende de la relación superficie/volumen del árido. Por tanto, en el árido 12/20-T-R será menor en comparación con el árido 4/12-T-R, empleado en el hormigón HRM/AC12.

En consecuencia, puede que durante la fabricación de la dosificación HRM/AC20 haya quedado parte de agua sobrante, que fluidifique el hormigón, y por tanto, alcance una mayor extensión de flujo.

4.2.2 Estado endurecido: Propiedades físicas

Antes de presentar los resultados experimentales relativos a la densidad y porosidad, en los próximos párrafos va a estimarse, de forma teórica, la variación de densidad en un hormigón autocompactante, cuya fracción gruesa esté compuesta al 100% por árido reciclado mixto.

Según las recomendaciones establecidas para la fabricación de un hormigón autocompactante dadas por Okamura y Ouchi (2003) o la RILEM Commitee TC 205-DSC (De Shutter y Audenaert, 2008), el árido grueso representa entre un 30 y un 35 % del volumen total de hormigón. En nuestro caso, dicha fracción gruesa se sustituye completamente por árido reciclado mixto, con una densidad entre un 18 y un 23 % inferior a la de un árido grueso natural, dependiendo del tipo de árido empleado: 4/12-T-R ($\rho = 2,06 \text{ g/cm}^3$) o 12/20-T-R ($\rho = 2,19 \text{ g/cm}^3$). Esta sustitución en el esqueleto granular trae consigo, a igualdad del resto de variables, una disminución de la densidad del hormigón, respecto a uno convencional, que oscila de entre el 5,5 y el 8 %

La afirmación realizada en el párrafo anterior se justifica partiendo de las expresiones [4.1] y [4.2]. En ellas, se estiman las densidades de un hormigón autocompactante convencional (HM), y de uno fabricado con áridos reciclados (HRM), respectivamente.

$$\rho_{HM} = \frac{\rho_{CEM} \cdot V_{CEM} + \rho_{N0/4} \cdot V_{N0/4} + \rho_{N6/12} \cdot V_{N6/12} + \rho_a \cdot V_a + p \cdot V_p}{V_H} \quad [4.1]$$

$$\rho_{HRM} = \frac{\rho_{CEM} \cdot V_{CEM} + \rho_{0/4} \cdot V_{0/4} + \rho_{R4/12} \cdot V_{R4/12} + \rho_{R12/20} \cdot V_{R12/20} + \rho_a \cdot V_a + p \cdot V_p}{V_H} \quad [4.2]$$

- donde: ρ_{HM} : Densidad estimada para un hormigón en masa (g/cm^3)
 ρ_{HRM} : Densidad estimada para un hormigón en masa con árido reciclado (g/cm^3)
 ρ_i : Densidad del material "i" (en g/cm^3)
 V_i : Volumen relativo del material "i" respecto al total del hormigón.

En el cálculo realizado se utilizan las densidades de cada uno de los componentes utilizados para la fabricación de su esqueleto granular ρ_i (detallados en la Tabla 4.3), y los volúmenes relativos de éstos (V_i), sobre un metro cúbico de hormigón (Tabla 4.4), obtenidos a partir de las dosificaciones realizadas durante las campañas experimentales.

Cemento	0/4-T-N	6/12-T-N	4/12-T-R	12/20-T-R	Agua	Aire ocluido
3,06	2,65	2,65	2,06	2,19	1	0,001

Tabla 4.3. Densidades de los materiales utilizados (en g/cm^3)

Dosificación	Cemento	0/4-T-N	6/12-T-N	4/12-T-R	12/20-T-R	Agua	Σ
HM/AC12	0,116	0,464	0,219	-	-	0,17	0,969
HRM/AC12	0,121	0,453	-	0,236	-	0,22	1,030
HRM/AC20	0,121	0,457	-	0,079	0,153	0,19	1,000
HRM/AC20+I	0,121	0,457	-	0,097	0,178	0,17	1,023

Tabla 4.4. Volúmenes relativos de cada componente en la dosificación [-]

Nótese en la Tabla 4.4 que la suma de los volúmenes relativos de cada componente, no es igual a 1,00. Ello se debe a dos motivos, por un lado, no se ha considerado en el cálculo el volumen de los componentes minoritarios, como los aditivos químicos o las fibras de acero y, por otro lado, al hecho de utilizar áridos reciclados, de menor densidad que un árido convencional, lo que introduce pequeños errores en el momento de dosificar, por peso, en una planta de hormigonado.

Particularizando las expresiones [4.1] y [4.2] para las densidades de los materiales utilizados, y los datos volumétricos de las cuatro dosificaciones, puede deducirse la densidades teórica en los cuatro casos analizados: la dosificación patrón (HM/AC12) y las tres dosificaciones de HRM, respectivamente, tal y como se muestra en las expresiones [4.3], [4.4], [4.5] y [4.6]

$$\rho_{HM/AC12} = \frac{3,06 \cdot 0,116 + 2,65 \cdot 0,464 + 2,65 \cdot 0,219 + 0,147 \cdot 0,001}{0,969} = 2,23 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad [4.3]$$

$$\rho_{HRM/AC12} = \frac{3,06 \cdot 0,121 + 2,65 \cdot 0,453 + 2,06 \cdot 0,236 + 0,178 \cdot 0,001}{1,030} = 2,00 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad [4.4]$$

$$\rho_{HRM/AC20} = \frac{3,06 \cdot 0,121 + 2,65 \cdot 0,457 + 2,06 \cdot 0,079 + 2,19 \cdot 0,153 + 0,175 \cdot 0,001}{1,000} = 2,08 \frac{g}{cm^3} \quad [4.5]$$

$$\rho_{HRM/AC20I} = \frac{3,06 \cdot 0,121 + 2,65 \cdot 0,457 + 2,06 \cdot 0,097 + 2,19 \cdot 0,179 + 0,137 \cdot 0,001}{1,023} = 2,12 \frac{g}{cm^3} \quad [4.6]$$

De las expresiones anteriores se deduce que la densidad varía de forma lineal con el contenido de árido reciclado utilizado. Si bien, la incidencia de cada uno de ellos no es idéntico, dadas sus densidades diferentes. La utilización conjunta de las dos tipologías de árido reciclado (dosificaciones HRM/AC20 y HRM/AC20+I) permite alcanzar densidades superiores respecto el caso donde únicamente se emplea el árido reciclado 4/12-T-R (dosificación HRM/AC12), debido a la menor densidad de éste árido.

Debe aclararse que para el cálculo teórico realizado en las expresiones [4.3] a [4.6], se han tomado como datos representativos, los valores de porosidad obtenidos experimentalmente para cada dosificación, los cuales se muestran posteriormente en la Figura 4.2.

En la Figura 4.2 se presentan los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de densidad aparente y porosidad, sobre probetas moldeadas en planta (Figura 4.2a), a dos edades diferentes: 180 y 365 días (Figura 4.2b). Durante todo ese periodo de tiempo, las probetas se conservaron en la cámara climática del LTE Luis Agulló, en condiciones controladas de temperatura ($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) y humedad relativa ($50 \% \pm 5 \%$).

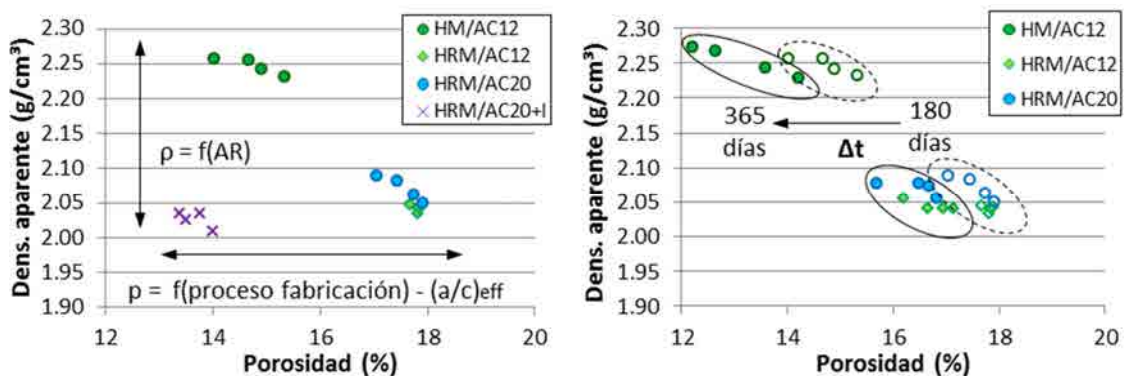


Figura 4.2. Campaña en planta. Relación densidad aparente – porosidad en función de: a) tipo de dosificación (a 180 días), b) edad variable a 180 y 365 días

Un primer resultado a destacar es que la densidad aparente en todos los casos (incluida la dosificación patrón) se sitúa en el intervalo 2,02 a 2,25 g/cm^3 , valores inferiores al de un hormigón convencional vibrado, que suele situarse entre los 2,3 y los 2,4 g/cm^3 . Esta reducción puede responder al mayor contenido de finos que requiere un

hormigón autocompactante, (en definitiva, al mayor contenido de pasta) y, a la menor densidad de los áridos reciclados (presentada en la Tabla 3.5 el capítulo anterior), lo cual se manifiesta en que en las tres dosificaciones que contienen árido reciclado mixto (HRM), ese valor es menor que el obtenido en el hormigón patrón HM/AC12.

Estos resultados están en línea, tanto con los valores teóricos obtenidos en las expresiones [4.3] a [4.6], como con lo recogido en la literatura técnica para hormigones reciclados con áridos mixtos (Martínez-Lage *et al.*, 2012) y son algo inferiores al caso de que los áridos reciclados sean procedentes de hormigón (Gómez-Soberón *et al.*, 2002; Etxeberria *et al.*, 2007; Grdic *et al.*, 2010; González-Fonteboa *et al.*, 2011)

Un segundo aspecto a resaltar, que se extrae de la Figura 4.2a, es la diferencia de porosidad en función del sistema de saturación. En ella puede verse que para el mismo tipo de árido, la porosidad de las dosificaciones con áridos saturados con agua HRM/AC12 y HRM/AC20 se encuentra el entorno del 17 al 18 %, valores superiores al 13 – 15 % obtenidos en la dosificación HRM/AC20+I, en la que se empleó el sistema del aditivo hidrófugo, o en la dosificación patrón HM/AC12, sobre la cual no se realizó ningún tratamiento de saturación. Ello puede responder, a un aporte excesivo de agua de saturación en las dosificaciones HRM/AC12 y HRM/AC20. En este supuesto, al evaporarse el exceso de agua situada alrededor de los áridos reciclados, se genera una porosidad adicional, concentrada especialmente en la interfase árido reciclado–pasta.

Otro resultado reseñable, si se comparan los resultados a 180 y 365 días, es la reducción de porosidad en el tiempo, tal y como se muestra en la Figura 4.2b. Esta reducción, que oscila entre el 1 y el 2 %, puede ser fruto de que una parte del cemento sigue hidratándose debido a la reserva de agua disponible en los poros, ya sea del árido reciclado o del propio hormigón, si bien no viene acompañada de un aumento de la densidad aparente.

En la Tabla 4.5 se presentan los valores de las densidades medias obtenidas en cada dosificación a la edad de 180 días. Estos resultados se presentan junto con la variable que mayor incidencia puede tener sobre la densidad de los hormigones fabricados: el contenido de árido reciclado.

Dosificación	Contenido AR (kg)	Dens. media (g/cm ³)
HM/AC12	0	2,246
HRM/AC12	531	2,040
HRM/AC20	497	2,071
HRM/AC20+I	590	2,025

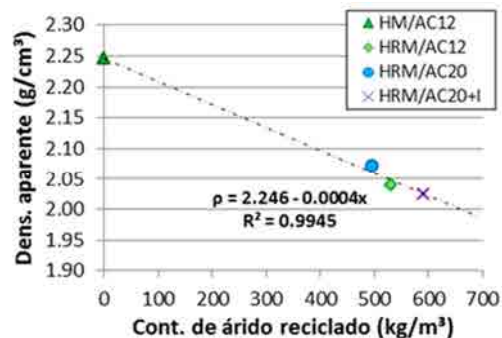


Tabla 4.5. Influencia del contenido de árido reciclado en la densidad

Los resultados de la Tabla 4.5 muestran que a medida que se aumenta el contenido de árido reciclado, la densidad media disminuye de forma lineal, con una reducción aproximada de 0,04 g/cm³ por cada 100 kg de árido reciclado mixto utilizado. Para estimar la densidad de un hormigón fabricado con los áridos reciclados 4/12-T-R y 12/20-T-R, la Tabla 4.6 proporciona los valores obtenidos en algunos casos particulares.

ρ_{HRM} (en g/cm ³)	Contenido de árido 4/12-T-R (en kg/m ³)									
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	
Contenido de árido 12/20-T-R (en kg/m ³)	0	2,234	2,206	2,178	2,150	2,122	2,094	2,066	2,038	2,010
	100	2,213	2,185	2,157	2,129	2,101	2,073	2,045	2,017	-
	200	2,192	2,164	2,136	2,108	2,080	2,052	2,024	-	-
	300	2,171	2,143	2,115	2,087	2,059	2,031	-	-	-
	400	2,150	2,122	2,094	2,066	2,038	-	-	-	-
	500	2,129	2,101	2,073	2,045	-	-	-	-	-

Tabla 4.6. Densidad del hormigón HRM en función del contenido, y tipo, de árido reciclado

Nótese que se ha fijado en 800 kg/m³ el contenido máximo de árido grueso reciclado. Este valor se obtiene a partir de las limitaciones relativas a la composición del esqueleto granular en un hormigón autocompactante, que limita el contenido de árido grueso al 30 % del total. En este caso extremo, la reducción respecto un hormigón convencional, alcanza los 0,22 g/cm³, con una densidad de 2,01 g/cm³.

4.2.3 Estado endurecido: Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión

En la Figura 4.3 se presentan los resultados de resistencia a compresión obtenidos de las probetas moldeadas durante la campaña llevada a cabo en el LTE Luis Agulló. Para cada dosificación, se han ensayado nueve probetas: 3 probetas para cada edad de 7 días, 28 días y 365 días. La función de ajuste utilizada (ecuación 4.7), que describe la evolución de la resistencia a compresión en el tiempo, es la propuesta en el artículo 31.3 de la EHE-08 (CPH, 2008).

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\} \cdot f_{cm} \quad [4.7]$$

donde: f_{cm} : Resistencia media a compresión a 28 días

β_{cc} : Coeficiente que depende de la edad del hormigón

s : Coeficiente que depende del tipo de cemento; igual a 0,2 para CEM 42,5R.

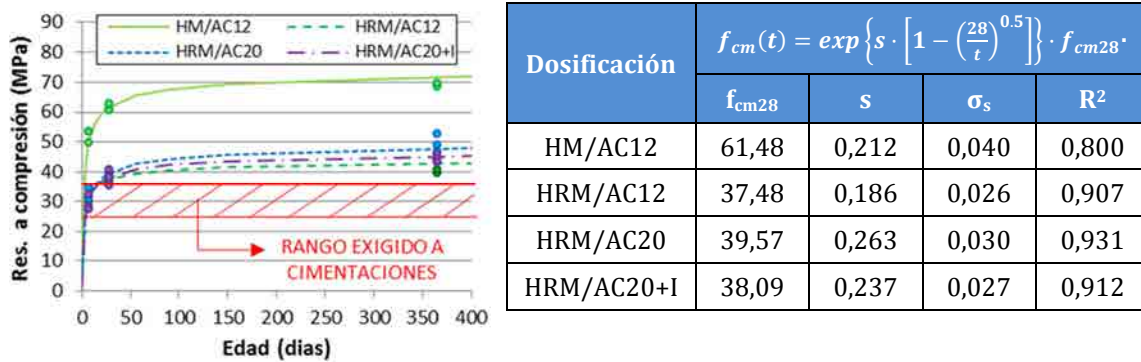


Figura 4.3. Campaña en LTE. Evolución de la resistencia media a compresión (f_{cm})

En la citada figura puede verse que el ajuste gráfico es satisfactorio para los cuatro casos analizados ($R^2 > 0,80$), independientemente del tipo de árido empleado en cada caso. Este hecho señala que la expresión [4.7] puede ser extrapolable a hormigones fabricados con áridos reciclados. Por tanto, se deduce que la influencia del árido es despreciable en la evolución de resistencias en el tiempo, siendo el tipo de cemento utilizado, la variable principal.

Un aspecto diferente es el valor absoluto de la resistencia a 28 días, pudiéndose observar que el valor medio de resistencia de la dosificación realizada con árido natural HM/AC12, es significativamente mayor a las alcanzadas en las tres dosificaciones con árido reciclado (HRM/AC12, HRM/AC20 y HRM/AC20+I). Tal y como muestra la Tabla 4.7, estos resultados representan una reducción de entre el 35,6 y el 39,0 %, Si bien es una disminución ciertamente relevante, las resistencias alcanzadas con las dosificaciones HRM, se sitúan por encima del rango exigido en numerosas aplicaciones estructurales (25-35 MPa).

Dosificación	Contenido árido reciclado (kg)			f_{cm28} (MPa)	Δf_c (%)	s [-]	Δs (%)
	4/12-T-R	12/20-T-R	Total				
HM/AC12	0	0	0	61,48	--	0,212	--
HRM/AC12	590	--	590	37,48	-39,0	0,186	-12,2
HRM/AC20	180	360	540	39,57	-35,6	0,263	+24,1
HRM/AC20+I	200	390	590	38,09	-38,0	0,237	+11,8

Tabla 4.7. Influencia del contenido de árido reciclado sobre la reducción de f_{cm}

En menor medida, también puede apreciarse una cierta influencia del tamaño máximo del árido reciclado sobre la resistencia a compresión. Así, las muestras pertenecientes a la dosificación HRM/AC20+I, fabricada con 200 kg/m³ de 4/12-T-R y 390 kg de 12/20-T-R, alcanzan resistencias un 1,4 % superiores a las de la dosificación HRM/AC12, realizada con 590 kg/m³ de árido 4/12-T-R. Ello puede deberse a una mayor compacidad alcanzada gracias al uso combinado de ambas granulometrías, obteniendo un hormigón con mejores prestaciones físicas (Figura 4.2a) y resistentes (Figura 4.3)

Módulo de elasticidad

En la Tabla 4.8, se presentan los módulos de elasticidad obtenidos tras ensayar las probetas moldeadas durante la campaña en LTE. Para cada dosificación se han ensayado un total de 6 probetas: tres a 28 días y tres a 365 días. Junto a dichos valores, en la tabla se detalla el contenido, y tipología, de árido reciclado utilizado en cada una de las cuatro dosificaciones analizadas.

Dosificación	Contenido árido reciclado			E (GPa)		ΔE (%)	
	4/12-T-R	12/20-T-R	Total	28 d	365 d	28 d	365 d
HM/AC12	0	0	0	35,989	42,343	--	--
HRM/AC12	590	--	590	22,973	25,404	-36,2	-40,0
HRM/AC20	180	360	540	25,363	29,182	-29,5	-31,1
HRM/AC20+I	200	390	590	24,155	27,317	-32,9	-35,5

Tabla 4.8. Influencia del contenido (y tipo) de árido reciclado sobre la reducción de E

La reducción del módulo de elasticidad en las dosificaciones con áridos reciclados (HRM) se sitúa entre el 29,5 y el 36,2 % a los 28 días, llegando hasta el 40 % en la dosificación HRM/AC12 a los 365 días. Esta disminución del módulo de elasticidad puede restringir el uso de este tipo de hormigones en estructuras donde las deformaciones o flechas sean un factor determinante, tales como puentes o pasarelas, si bien puede ser factible en caso de emplear porcentajes de sustitución menos ambiciosos. Sin embargo, los valores alcanzados (entre 23 y 29 GPa) no suponen una gran problemática en otras tipologías estructurales como las estructuras de cimentación.

Las conclusiones de esta tabla son idénticas a las comentadas anteriormente sobre la reducción de la resistencia a compresión. La elevada presencia de mortero y material cerámico en los áridos reciclados utilizados, así como un mayor número de interfases árido-pasta (ITZ) suponen una mayor deformabilidad del hormigón HRM resultante frente a cargas (Poon *et al.* 2004), lo que se traduce en una reducción significativa del módulo de elasticidad en este tipo de hormigones, en comparación con la dosificación patrón HM/AC12.

Relación resistencia a compresión - Módulo de elasticidad

Una vez analizados ambos parámetros (resistencia a compresión y módulo de elasticidad), se estima conveniente verificar la validez de las relaciones f_c - E propuestas para un hormigón con una fracción gruesa compuesta al 100 % por árido reciclado mixto, por la Instrucción EHE-08 (CPH, 2008) y otras normativas o referentes internacionales, tales como el Eurocode-2 (ENV, 1992), la Fédération International du Béton (FIB, 2010), la American Concrete Institute (ACI, 2005); la Norma Brasileira 6118 (NBR, 2014) o la Turkish Standard (TS, 2000).

En la Figura 4.4 se comparan los resultados experimentales obtenidos a partir de las probetas moldeadas durante la campaña en el LTE Luis Agulló, frente a dichas expresiones.

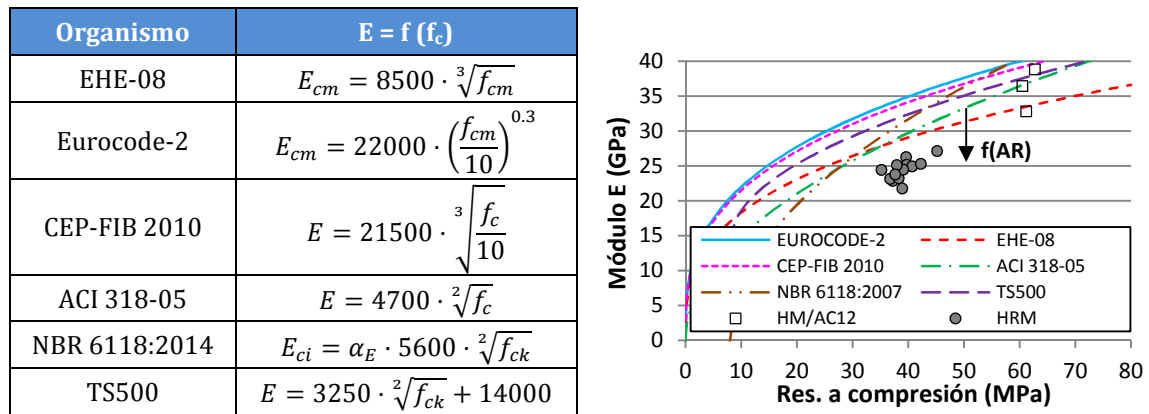


Figura 4.4. Correlación entre el Módulo de elasticidad (E) y la resistencia a compresión (f_{cm}), según diferentes normativas internacionales. Propuestas existentes – Datos experimentales

Como puede verse en la Figura 4.4, los valores resultantes de la dosificación patrón HM/AC12 se encuentran dentro de la zona propuesta por las diferentes normativas o regulaciones internacionales. Por el contrario, los módulos correspondientes a las dosificaciones HRM se encuentran, tal y como era de esperar, entre un 10,7 y un 42,7 % por debajo del valor estimado (ver Tabla 4.9). Este hecho nos indica que la utilización de árido reciclado mixto incide en mayor medida sobre el módulo de elasticidad que sobre la resistencia a compresión.

Dosificación	EC-2	EHE-08	ACI 318-05	NBR 6118:2007	CEP-FIB 2010	TS500
HM/AC12	12,50	-6,36	-3,64	6,10	4,59	0,07
HRM/AC12	42,74	18,82	21,25	28,98	39,50	32,34
HRM/AC20	32,95	10,66	15,02	23,91	29,92	23,56
HRM/AC20+I	37,66	14,59	17,72	25,82	34,54	27,74

Tabla 4.9. $E = f(f_c)$. Diferencia entre valores teóricos y experimentales (en %)

En base a los datos presentados tanto en la Figura 4.4 como en la Tabla 4.9, resulta de especial interés proponer expresiones alternativas que consideren el efecto que provoca la utilización de áridos reciclados sobre la relación entre dos parámetros fundamentales a nivel de proyecto como son, la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

En este sentido, varios autores (Ravindrajarah y Tam, 1985; Dillmann, 1998; Dhir *et al.* 1999; Mellmann, 1999; Zilch y Roos, 2001; Evangelista y Brito, 2007; Corinaldesi,

2010; Kou, y Poon, 2013; Tanchirapat *et al.* 2013) ya han propuesto con anterioridad expresiones en base a estudios realizados. Sin embargo, en ninguno de ellos se analiza en el caso de hormigones con una fracción gruesa compuesta al 100% por árido reciclado mixto.

Partiendo de expresiones del tipo [4.8] y [4.9], habitualmente propuestas para relacionar ambos parámetros (véase la Figura 4.4), se considera un factor $\tilde{\alpha}_{AR}$ ($0 < \tilde{\alpha}_{AR} \leq 1$), función del contenido de árido grueso reciclado mixto (en kg/m³).

$$E_{cm} = 8500 \cdot \tilde{\alpha}_{AR} \cdot \sqrt[3]{f_c} = A \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad [4.8]$$

$$E_{cm} = 4700 \cdot \tilde{\alpha}_{AR} \cdot \sqrt[2]{f_c} = B \cdot \sqrt[2]{f_c} \quad [4.9]$$

donde: E_{cm} : Módulo de elasticidad secante, a 28 días (en MPa).

f_c : Resistencia a compresión, a 28 días (en MPa)

$\tilde{\alpha}_{AR}$: Factor reductor, función del contenido de árido grueso reciclado [-]

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado con los datos obtenidos en las 36 probetas moldeadas en el LTE (seis por cada dosificación) y los correspondientes a 60 probetas-testigos extraídos de los batches ejecutados durante la prueba piloto. El programa informático empleado ha sido *LAB FIT Curve Fitting software*.

Dosificación		Cont. AR (kg/m ³)	C _f (kg/m ³)	n	$E = A \cdot \sqrt[3]{f_c}$			$E = B \cdot \sqrt[2]{f_c}$		
					A	σ_A	R ²	B	σ_B	R ²
EHE-08/ACI 318-05		-	-	-	8500	-	-	4700	-	-
Probetas moldeadas	HM/AC12	0	0	6	9634	291	0,600	4770	129	0,598
	HRM/AC12	590	0	6	7173	165	0,387	3884	185	0,384
	HRM/AC20	540	0	6	7716	144	0,929	4097	49	0,930
	HRM/AC20+I	590	0	6	7455	204	0,467	4008	103	0,469
	HRF/AC12-35b	520	20	6	7647	135	0,938	4046	49	0,937
	HRF/AC20-50	520	20	6	7452	257	0,660	3982	119	0,660
Probetas testigo	HM/AC12	0	0	7	9506	113	0,839	4970	111	0,837
	HRM/AC12	531	0	4	6787	105	0,679	3677	98	0,672
	HRM/AC20	497	0	14	7218	143	0,144	3820	78	0,148
	HRM/AC20+I	590	0	14	7674	108	0,273	4100	65	0,272
	HRF/AC12-35b	468	20	13	7534	149	0,295	3979	83	0,294
	HRF/AC20-50	478	20	8	8136	113	0,140	4284	84	0,153

Tabla 4.10. Relación $f_c - E$. Análisis estadístico.

(Datos: Probetas moldeadas en LTE Luis Agulló y probetas-testigo de los batches)

Para las probetas moldeadas, los valores de “A” y “B” obtenidos se encuentran entre un 10,0 y un 16,4 % por debajo del valor propuesto por la instrucción EHE-08 ($A = 8500$) y son entre un 13,8 y un 18,4 % inferiores al parámetro propuesto por la ACI 318-05 ($B = 4700$), respectivamente. La mayor reducción se corresponde en ambos casos, con la dosificación HRM/AC12, fabricada con 590 kg de árido reciclado 4/12-T-R. En el lado opuesto, el menor descenso se produce con la dosificación HRM/AC20, fabricada con 180 kg de árido reciclado 4/12-T-R y 360 kg de árido reciclado 12/20-T-R.

La dosificación patrón HM/AC12 alcanza módulos de elasticidad superiores a los estimados a priori por las expresiones propuestas, con un parámetro “A” igual a 9634, frente al 8500 propuesto por la EHE-08 y un parámetro “B” igual a 4770, frente al 4700 propuesto por la ACI 318-05. En base a esta comparativa, parece ser que una expresión del tipo [4.9] (empleando una raíz cuadrada), se adapta mejor a los materiales empleados durante las campañas experimentales, lo cual concuerda con las expresiones propuestas en versiones anteriores de la EHE-08.

Para las probetas correspondientes a los testigos de los bataches, los valores de “A” y “B” obtenidos en este caso son similares a los correspondientes a probetas moldeadas (Ver Tabla 4.10). La mayor variabilidad obtenida respecto al análisis anterior, especialmente en las dosificaciones HRM/AC20, HRM/AC20+I, HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50, con valores de $R^2 \ll 1$, puede indicar una distribución poco homogénea del árido reciclado en los batache, o bien una influencia de la puesta en obra. Este fenómeno no se manifiesta con tanta intensidad en las probetas fabricadas en el LTE, debido a un proceso de fabricación mucho más controlado y a un reducido volumen de amasado (20 - 30 litros por amasada).

Los valores obtenidos para las dosificaciones HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50 se encuentran en línea con el resto de dosificaciones, independientemente de la procedencia del elemento ensayado (probeta moldeada o testigo). Por tanto, la adición de 20 kg/m^3 de fibras de acero, no comporta un cambio significativo sobre la relación $f_c - E$, tal y como sí propone la *RILEM TC 162-TDF* (Vanderwalle *et al.*, 2003), que aumenta el valor de “A” de 8500 a 9500. Ello puede deberse a que el contenido de fibras utilizado (20 kg/m^3) no es suficientemente elevado para modificar significativamente el comportamiento deformacional del hormigón en su fase elástica.

Como complemento de lo comentado en el párrafo anterior, en la Figura 4.5 se representan gráficamente los resultados $f_c - E$ de las dosificaciones HRM y HRF, obtenidos tanto en probetas moldeadas (Figura 4.5a) como en probetas testigo (Figura 4.5b). En ambos casos se observa un comportamiento similar en ambas tipologías de hormigones, independientemente del uso o no de fibras.

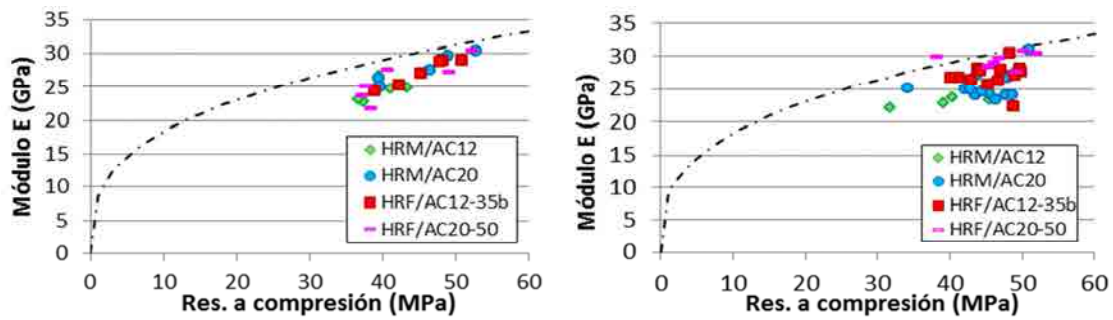


Figura 4.5. Relación f_c –Módulo E. a) Probetas LTE, b) Testigos batches

En la Figura 4.6 se representa la influencia del contenido de árido grueso reciclado (en kg/m^3) sobre la relación f_c –E, a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 4.10, para ambos tipos de probetas (moldeadas y testigo),

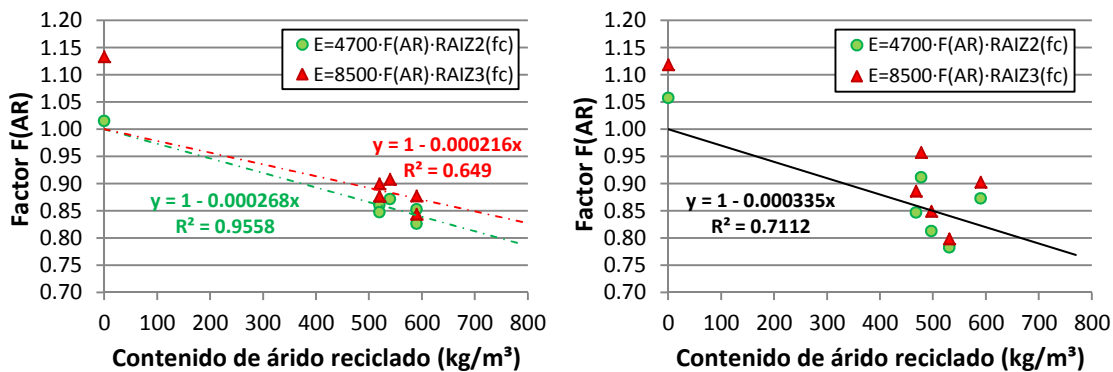


Figura 4.6. Obtención gráfica del parámetro \tilde{f}_{AR} . a) Probetas LTE, b) Testigos batches.

Las líneas de tendencia $y = f(x)$ obtenidas, determinan la variación del factor $\tilde{\alpha}_{AR}$ en función del contenido de árido grueso reciclado utilizado. Nótese la imposición realizada ($\tilde{\alpha}_{AR}(0) = 1,00$), con el fin de mantener la coherencia entre las formulaciones existentes y las propuestas. La mejor adaptación entre resultados experimentales y formulación se obtiene con la expresión del tipo $E = f(\sqrt[2]{f_c})$, con un $R^2 = 0,956$, frente a un $R^2 = 0,649$ de la expresión del tipo $E = f(\sqrt[3]{f_c})$. Por tanto, las expresiones [4.8] y [4.9], una vez adaptadas quedan de la siguiente forma:

$$E_{cm} = 8500 \cdot \tilde{\alpha}_{AR} \cdot \sqrt[3]{f_c} = 8500 \cdot (1 - 0.000216 \cdot AR) \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad [4.10]$$

$$E_{cm} = 4700 \cdot \tilde{\alpha}_{AR} \cdot \sqrt[2]{f_c} = 4700 \cdot (1 - 0.000268 \cdot AR) \cdot \sqrt[2]{f_c} \quad [4.11]$$

donde: E_{cm} : Módulo de elasticidad secante, a 28 días (en MPa).

f_c : Resistencia a compresión, a 28 días (en MPa)

AR: Contenido de árido grueso reciclado mixto (en kg/m^3)

Resistencia a flexión

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados del ensayo de flexión realizado sobre las probetas prismáticas 100 x 100 x 400 moldeadas en planta (3 por dosificación). Junto al valor medio de la resistencia a flexotracción ($f_{ctm,n}$) se adjunta el valor de resistencia media a compresión a 28 días (f_{cm}). Con ambos valores, y aplicando la expresión [4.12] propuesta por la EHE-08, puede realizarse la comparativa entre el valor obtenido de forma experimental respecto al teórico, y valorar la validez de dichas expresiones para hormigones con una fracción gruesa compuesta al 100 % por árido reciclado mixto.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad f_{ctm,fl} = \left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ct,m} \equiv 1,5 \cdot (0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}) \quad [4.12]$$

Dosificación	f_{cm} (N/mm ²)	$f_{ctm,n}$ experimental (N/mm ²)	$f_{ctm,n}$ teórica ¹ (N/mm ²)	Error relativo (%)
HRM/AC12	33,61	4,71	4,69	0,43
HRM/AC20	35,67	4,80	4,87	-1,44
HRM/AC20+I	33,06	5,27	4,64	13,43
HRF/AC12-35a	27,70	4,67	4,12	13,35
HRF/AC12-35b	37,83	5,24	5,07	3,35
HRF/AC20-50	44,80	5,74	5,68	1,06

¹ Según la EHE-08, la resistencia a flexotracción puede relacionarse con la resistencia a compresión a partir de la expresión [4.12]:

Tabla 4.11. Resistencia a flexotracción. Comparativa entre datos experimentales y teóricos

Las pequeñas diferencias entre los valores experimentales obtenidos y el valor predicho a partir de la expresión propuesta por la EHE-08, demuestran que, en hormigones HRM/HRF, las resistencias a flexión y compresión se ven alteradas de modo similar. De modo, que la expresión [4.12] es válida para los hormigones analizados.

4.3 INFLUENCIA DE LAS FIBRAS DE ACERO

Para analizar la influencia de las fibras de acero sobre las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, se comparan por un lado, los resultados correspondientes a la dosificación HRM/AC12 con respecto a los obtenidos con las dosificaciones HRF/AC12-35a y HRF/AC12-35b y, por otro, los de la dosificación HRM/AC20 con los de la dosificación HRF/AC20-50, tal como se muestra en la Tabla 4.12.

De este modo, comparando dosificaciones de similar esqueleto granular, puede estudiarse el efecto que provocan las dos tipologías de fibra empleada: la fibra de acero M503 ($l_f = 35$ mm; $l_f/\phi_f = 46$) y la fibra de acero M502 ($l_f = 50$ mm; $l_f/\phi_f = 50$), independientemente de otros factores, como el contenido de árido reciclado.

Objetivo	Dosificación	Materiales utilizados			
		4/12-T-R	12/20-T-R	Fibras acero M503	Fibras acero M502
Analizar influencia de las fibras M503 ($l_f = 35$ mm)	HRM/AC12	✓	--	--	--
	HRF/AC12-35a	✓	--	✓	--
	HRF/AC12-35b	✓	--	✓	--
Analizar influencia de las fibras M502 ($l_f = 50$ mm)	HRM/AC20	✓	✓	--	--
	HRF/AC20-50	✓	✓	--	✓

Tabla 4.12. Influencia de las fibras de acero. Composición de las dosificaciones utilizadas

4.3.1 Estado fresco: consistencia del hormigón

En la Figura 4.7 se muestran los resultados del ensayo de extensión de flujo obtenidos de las dosificaciones señaladas en la Tabla 4.12.

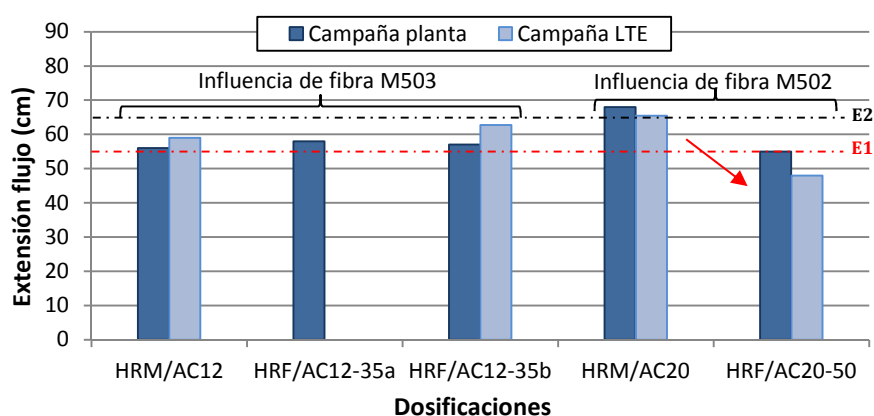


Figura 4.7. Consistencia de los hormigones. Influencia de las fibras de acero

Los resultados se sitúan entre los 48 y los 68 cm. De las nueve extensiones de flujo presentadas, únicamente la correspondiente a la dosificación HRF/AC20-50 realizada durante la campaña en el LTE Luis Agulló no alcanza los 55 cm mínimos exigidos a un hormigón autocompactante. En el lado opuesto, se sitúa el hormigón HRM/AC20 que alcanza valores de hormigón autocompactante de categoría E2 ($\emptyset_{EXT} > 65$ cm), según la nomenclatura utilizada por la EHE-08. El resto de hormigones se catalogan como hormigones autocompactantes E1, con valores comprendidos entre los 55 y los 65 cm.

En vista de las consistencias de las dosificaciones HRM/AC12 (sin fibras) y HRF/AC12-35b (con fibras), se confirma que es factible alcanzar consistencias autocompactantes en dosificaciones de HRF. Concretamente, la dosificación HRF/AC12-35b, fabricada con 20 kg/m^3 de fibras de acero M503, alcanza una extensión de flujo de 63

cm, superior a la obtenida con la dosificación sin fibras HRM/AC12 (56 – 59 cm). Ello se consigue realizando una modificación sobre el esqueleto granular de la dosificación, incrementando en 60 kg/m^3 el contenido de arena 0/4-T-N (desde 1200 a 1260 kg/m^3) y aumentando en $0,5 \text{ l/m}^3$ el aditivo superplastificante aportado (de $6,8$ a $7,3 \text{ l/m}^3$).

En cambio, si se comparan los resultados entre las dosificaciones HRM/AC20 y HRF/AC20-50, el diámetro de extensión de flujo se reduce 13 cm en la campaña en planta (pasa de 68 cm a 55 cm) y hasta en 18 cm durante la campaña en LTE (pasa de 66 cm a 48 cm). La adición de fibras M502 restringe en mayor grado la capacidad de fluir del hormigón en comparación con las fibras M503, debido a la mayor longitud (y relación de aspecto) de las primeras. En este segundo caso analizado, las modificaciones realizadas (incremento de finos y aditivo superplastificante) resultan insuficientes para mantener una consistencia autocompactante.

4.3.2 Estado endurecido

En las gráficas de la Figura 4.8a se muestran los resultados de densidad y porosidad de las probetas cúbicas moldeadas en planta, en las dosificaciones HRF y HRM. Además, en la Figura 4.8b se relacionan los valores medios de la densidad aparente obtenida y resistencia a compresión a 28 días (f_{cm28})

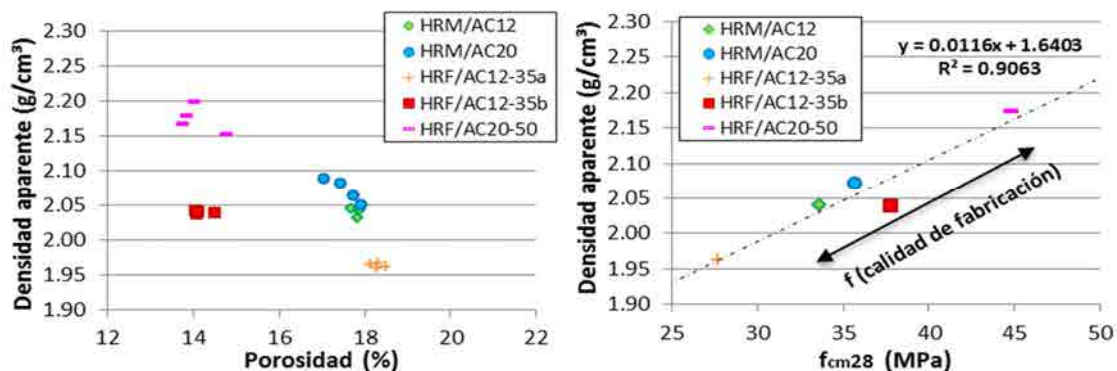


Figura 4.8. Influencia de las fibras de acero. a) Densidad- porosidad, b) Densidad – f_{cm28} (Datos: probetas moldeadas en planta)

La adición de 20 kg/m^3 de fibras de acero no comporta un cambio significativo sobre la densidad y porosidad. En la Figura 4.8a se observa que las dosificaciones HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50 reducen la porosidad hasta valores en el entorno del 14% . Sin embargo, la dosificación HRF/AC12-35a aumenta su porosidad por encima del 18% . En cuanto a la densidad aparente, se observan comportamientos opuestos respecto a las dosificaciones sin fibras HRM: aumento para la dosificación HRF/AC20-50 ($\rho = 2,15 - 2,20 \text{ g/cm}^3$); reducción para la dosificación HRF/AC12-35a ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$) y similar para la HRF/AC12-35b.

La Figura 4.8b muestra una relación lineal entre densidad y resistencia a compresión a 28 días. La mayor densidad aparente obtenida en las probetas pertenecientes a la dosificación HRF/AC20-50 ($\rho = 2,15 - 2,20 \text{ g/cm}^3$), fabricada con 20 kg/m^3 de fibra de acero y 520 kg/m^3 de árido reciclado, se corresponde con la mayor resistencia a compresión, de $44,3 \text{ MPa}$ a 28 días. La situación opuesta se produce con los datos obtenidos para la dosificación HRF/AC12-35a, fabricada con un contenido idéntico de fibras y un esqueleto granular muy similar, con apenas 20 kg/m^3 más de árido reciclado (540 kg/m^3), que debido a una densidad inferior a los $2,0 \text{ g/cm}^3$ y una porosidad del $18,3 \%$, apenas alcanza los $27,2 \text{ MPa}$ a 28 días (reducción del $38,6 \%$).

Por tanto, las diferencias observadas entre dosificaciones HRM y HRF, en propiedades como la densidad, porosidad o resistencia a compresión, no se debe al empleo de fibras de acero, sino a las diferencias en el contenido de árido reciclado (ya comentadas en el apartado 4.2.2), y a la calidad del proceso de fabricación. Nótese el siguiente hecho: las dosificaciones con mayores porosidades y menores densidades y resistencias (HRF/AC12-35a y HRM/AC12) coinciden con aquellas en que más agua tuvo que aportarse, ya en el camión hormigonera, para satisfacer con los requisitos autocompactantes.

Ahondando en la hipótesis sugerida en el párrafo anterior, en la Figura 4.9 se presenta la evolución de resistencia a compresión con el tiempo, a partir de los ensayos realizados a 7, 28, 90 y 365 días, sobre las probetas moldeadas en planta (Figura 4.9a) y en el LTE Luis Agulló (Figura 4.9b).

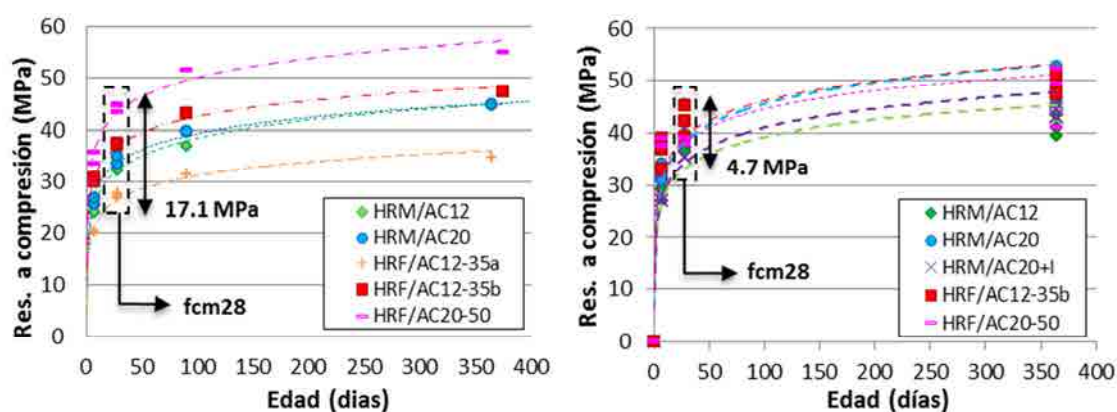


Figura 4.9. Influencia de las fibras de acero. Evolución de la resistencia a compresión.
a) Campaña en planta, b) Campaña en LTE

Se verifica que las diferencias observadas anteriormente, en la Figura 4.8b, en términos de resistencia a compresión entre dosificaciones, se reducen de forma significativa en cuanto se realiza un proceso de fabricación más controlado, como el llevado a cabo durante la campaña en el LTE Luis Agulló. Ello, permite reducir las diferencias observadas entre las dosificaciones fabricadas en planta. El rango de

resistencias medias a 28 días se reduce desde los 17,1 MPa de la campaña en planta (Figura 4.9a) a apenas 4,7 MPa (Figura 4.9b).

4.4 INFLUENCIA DEL MÉTODO DE PRE-SATURACIÓN

Cabe recordar que en el desarrollo de la investigación, se han utilizado dos métodos de saturación: pre-saturación mediante agua y aportación de un aditivo hidrófugo. En la Figura 4.10 se muestran los resultados del ensayo de extensión de flujo de las dosificaciones HRM/AC20 y HRM/AC20+I, obtenidas durante las campañas realizadas en planta y laboratorio. La principal diferencia entre ambas dosificaciones, salvo pequeñas variaciones del esqueleto granular, recae en el método de saturación de los áridos reciclados. Mientras que para la fabricación de la dosificación HRM/AC20 se opta por el método de pre-saturación con agua, en la dosificación HRM/AC20+I se ha empleado el aditivo hidrófugo experimental. De esta forma, puede analizarse la influencia que ejerce el método de saturación sobre la consistencia del hormigón.

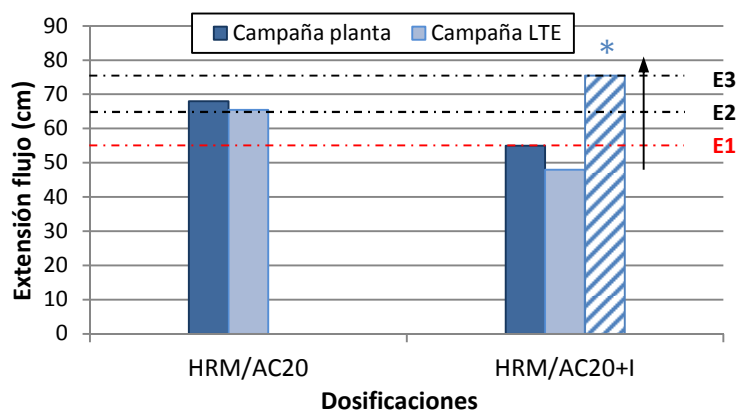


Figura 4.10. Consistencia de los hormigones. Influencia del método de saturación utilizado

Sobre la dosificación HRM/AC20 se realizan dos evaluaciones: campaña en planta y campaña en LTE Luis Agulló, mientras que en la dosificación HRM/AC20+I se añade una tercera (señalada con un asterisco en la Figura 4.10), correspondiente a la modificación realizada durante la fabricación en el LTE Luis Agulló, cuando tuvo que aumentarse el contenido de aditivo superplastificante desde los 7,3 l/m³, inicialmente previstos, hasta los 9,7 l/m³ (2,5 % s.p.c).

El método de pre-saturación con agua, utilizado en la dosificación HRM/AC20, permite conseguir extensiones de flujo superiores a los 65 cm en ambas campañas experimentales. Estos resultados se corresponden con un hormigón de categoría E2, según la nomenclatura propuesta por la instrucción EHE-08.

Sin embargo, la dosificación HRM/AC20+I no alcanza el umbral de 55 cm durante la campaña desarrollada en el LTE. Para corregir esta situación, y satisfacer los requisitos

preestablecidos ($\emptyset_{EXT} > 55$ cm), fue necesario incrementar el contenido de aditivo superplastificante. En vista de los resultados obtenidos con ambas metodologías, puede afirmarse que el contenido de aditivo hidrófugo predeterminado, e igual a $1,5 \text{ l/m}^3$ (0,23 % sobre el peso de árido reciclado) no resulta suficiente para cumplir con su objetivo.

La menor eficacia del aditivo hidrófugo experimental puede deberse a dos motivos. Por un lado, la elevada absorción de los áridos reciclados empleados (7,30 y 11,07 %), puede favorecer a que parte del aditivo aportado sea absorbido por los propios áridos. Por otro, el hecho de que el aditivo se mezcle con los áridos reciclados en el camión hormigonera, puede provocar que parte del mismo quede adherido en las paredes del vehículo. Una combinación de ambas causas conlleva que el contenido efectivo de aditivo resulte muy inferior al 0,23% necesario.

Para demostrar las afirmaciones anteriores, se llevó a cabo un test del comportamiento del aditivo experimental. Este consistió en preparar 10 muestras de 500 gramos de árido reciclado 12/20-T-R. En cada una de las muestras, se añadió un contenido diferente de aditivo hidrófugo: 0; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8 y 1,0 % sobre el peso de árido reciclado (s.p.AR). Una vez mezclados ambos componentes en un recipiente durante 4 minutos, se añadieron a la mezcla 125 ml de agua. Por último, transcurridos 2 minutos, se extrajeron del recipiente los áridos reciclados, y se determinó el contenido de agua restante en el recipiente. Los resultados obtenidos en esta prueba se muestran en la Figura 4.11.

Cont. aditivo (% sp.AR)	Cont. agua (ml)		Absorción (% sp.AR)
	Inicial	Final	
0,0	125	80	9,0
0,15	125	83	8,4
0,20	125	86	7,8
0,25	125	86	7,8
0,30	125	88	7,4
0,40	125	93	6,4
0,50	125	89	7,2
0,60	125	96	5,8
0,80	125	92	6,6
1,00	125	94	6,2

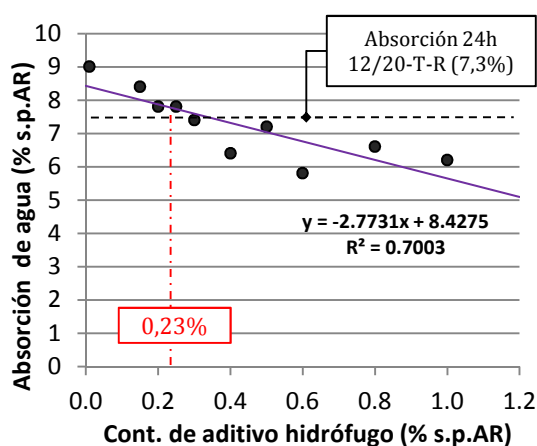


Figura 4.11. Resultados del Test de comportamiento del aditivo hidrófugo experimental.

Los resultados confirman el efecto hidrófugo del aditivo experimental, reduciéndose el contenido de agua absorbida a medida que se aumenta el contenido de aditivo. Sin embargo, el efecto provocado con el contenido predeterminado de 0,23 %

s.p.AR resulta muy limitado, ya que el agua absorbida alcanza valores superiores al 7 % s.p.AR (prácticamente idéntico al valor de absorción del árido reciclado 12/20-T-R).

Con los resultados obtenidos en el test puede afirmarse que, con el contenido de aditivo predeterminado (0,23 % sp.AR), prácticamente un 30 % del agua inicialmente aportada es absorbida por los áridos reciclados, con lo que el contenido efectivo de agua se reduce significativamente, provocando que la consistencia obtenida del hormigón en la dosificación HRM/AC20+I no alcance los requisitos de autocompactabilidad.

En la Tabla 4.13 se presentan las propiedades físicas y mecánicas más representativas de las dosificaciones HRM/AC20 y HRM/AC20+I: resistencia a compresión a 28 días, resistencia a flexotracción, módulo de elasticidad, densidad y porosidad. Los resultados se han obtenido a partir de las probetas moldeadas tanto en planta como en el LTE Luis Agulló.

Dosificación	Campaña en planta				Campaña en LTE	
	f_{cm28} (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	f_{cm28} (MPa)	E_{cm28} (MPa)
HRM/AC20	35,03	4,80	2,071	17,54	39,57	25362
HRM/AC20+I	34,46	5,27	2,025	13,66	38,09	24155
Variación (%)	-1,63	+9,79	-2,22	-22,12	-3,74	-4,76

Tabla 4.13. Propiedades en estado endurecido. Influencia del método de saturación utilizado

Las propiedades mecánicas (f_{c28} , E_{cm28} , $f_{ctm,fl}$) no se ven alteradas por el empleo de uno u otro método de saturación, con diferencias entre ambas metodologías de entre el 1,63 y el 9,79 %. La ligera reducción de resistencia, módulo de elasticidad y densidad observada en la dosificación HRM/AC20+I se debe al mayor contenido de árido reciclado empleado (590 frente a 540 kg), y no al método de saturación.

Por el contrario, tal y como ya se reflejó en la Figura 4.2, la utilización del aditivo inhibidor permite reducir la porosidad hasta un 22,1 % (13,66 frente a 17,54 %). Este hecho demuestra la gran importancia de realizar un control exhaustivo sobre el agua necesaria para saturar los áridos. Un exceso de la misma, permite fluidificar la mezcla y satisfacer con mayor facilidad los requisitos de autocompactabilidad (siempre y cuando no se produzcan segregaciones ni exudaciones), pero afectando negativamente a la estructura interna del hormigón, haciéndola más porosa y, por ende, menos duradera.

4.5 INFLUENCIA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

En este apartado se pretende determinar la influencia que tiene el procedimiento constructivo empleado durante la prueba piloto, sobre las siguientes propiedades del hormigón: densidad, porosidad, resistencia a compresión, contenido y orientación de

fibras. Para ello, se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos a partir de los testigos extraídos de los bataches ejecutados durante la prueba piloto, respecto a las muestras moldeadas en la planta de hormigonado. Las diferencias observadas entre ambas procedencias se deben, hipotéticamente, al transporte y puesta en obra del hormigón.

La ejecución de los seis bataches de sostenimiento se llevó a cabo con ayuda de una canaleta, un cubilote y un tubo “tremie”. Con estos tres elementos, el hormigón puede conducirse desde el camión hormigonera hasta la zanja previamente excavada. La dinámica de flujo del hormigón vertido en la zanja viene determinada por las condiciones de contorno utilizados durante la puesta en obra (Orbe *et al.*, 2012; Orbe, 2013). En este sentido pueden enunciarse dos hechos a remarcar:

1. De forma previa al vertido del hormigón, las zanjas se rellenaron con lodos ventoníticos (o tixotrópicos), para evitar desmoronamientos de las paredes laterales, al excavar en un terreno granular de poca cohesión y con el nivel freático cercano.
2. El extremo del tubo tremie se mantuvo, en todo momento, fijo en la parte profunda de la zanja, y por debajo de la superficie del hormigón ya vertido

Ambas afirmaciones se sostienen con las fotografías tomadas durante la visita a la obra, realizada tras finalizar la fabricación de hormigones en planta (Figura 4.12). En ellas se observa como el cubilote permanece totalmente fijo durante todo el proceso de vertido del hormigón. Por su parte, el lodo tixotrópico que inicialmente rellena la zanja (Figura 4.12a), asciende debido a su menor densidad ($\rho \sim 1,05 - 1,10 \text{ g/cm}^3$) respecto a la del hormigón, y se derrama en superficie (Figura 4.12b)



Figura 4.12. Procedimiento constructivo Batache #1, a) Inicio, b) Fin

Una vez comentadas y confirmadas las condiciones de puesta en obra, en la Figura 4.13 se representa la dinámica del flujo de hormigón en la zanja, particularizando para el batache #3. Cabe recordar que dicho batache estaba compuesto por dos dosificaciones diferentes: el hormigón patrón HM/AC12 (vertido en primer lugar), y el hormigón HRM/AC12 (vertido posteriormente), con un tiempo entre puestas de 30 - 45 minutos.

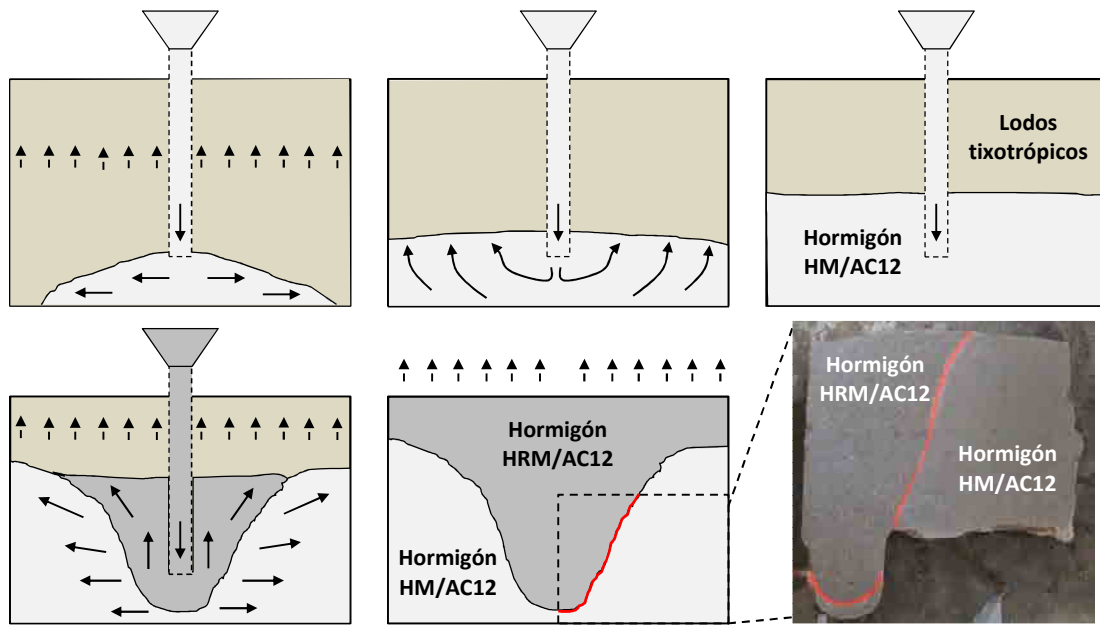


Figura 4.13. Ejecución del batache 3. Dinámica de flujo de los hormigones

El hormigón desciende por el tubo tremie hasta la zona profunda del batache. En ese punto, el hormigón fluye libremente en todas direcciones por el fondo de la zanja, gracias a su consistencia autocompactante (Figura 4.13a). Dado que el extremo del tremie se mantiene fijo por debajo de la superficie del hormigón que ya ha sido vertido (Figura 4.13c-d), a medida que se rellena la zanja, el hormigón que se vierte posteriormente (HRM/AC12) desplaza hacia los laterales de la zanja, el vertido previamente (HM/AC12), tal y como se esquematiza en la Figura 4.13d. Por su parte, el lodo tixotrópico, asciende hasta derramarse por la superficie. La distribución final de los dos hormigones (Figura 4.13e), coincide con la observada tanto en las tres losas pertenecientes a dicho batache (Figura 4.13f), como en los testigos cilíndricos obtenidos a partir de los TCZ.

Densidad y porosidad

En las gráficas de la Figura 4.14 se representan los resultados de densidad y porosidad correspondientes a las siete dosificaciones fabricadas en planta.

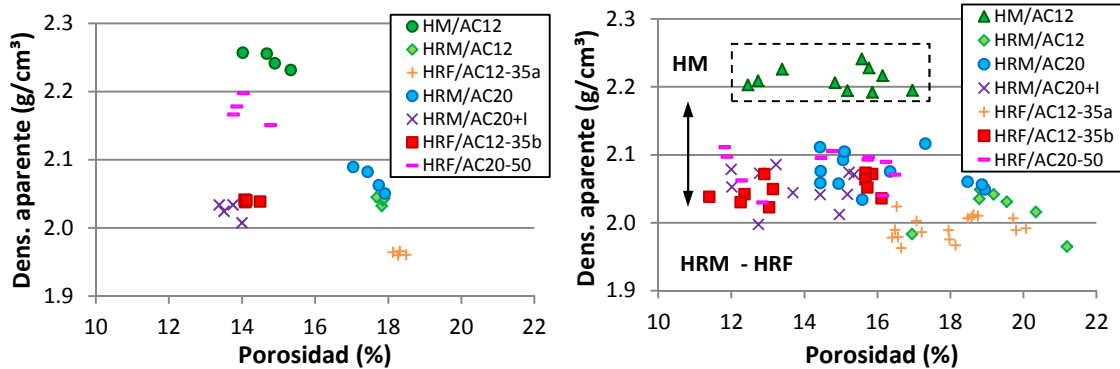


Figura 4.14. Relación densidad – porosidad. a) Probetas moldeadas en planta, b) Testigos

Los resultados pertenecientes a las probetas moldeadas se obtuvieron de 28 muestras prismáticas de dimensiones 75 x 75 x 150 mm (4 por dosificación). El número de muestras analizadas pertenecientes a los batches asciende a 82, obtenidas a partir del despiece de los testigos cilíndricos longitudinales (TCZ).

A tenor de los resultados obtenidos en ambos casos, probetas moldeadas (Figura 4.14a) y testigos extraídos (Figura 4.14b), se comprueba que la puesta en obra del hormigón aumenta la variabilidad de la densidad y porosidad del hormigón. Esta dispersión es mayor en las dosificaciones fabricadas con árido reciclado (HRM y HRF), con variaciones de densidad, dentro de una misma dosificación, de hasta el 0,10 g/cm³, debido a variaciones en la porosidad del hormigón y a posible distribución no homogénea de áridos reciclados.

Prácticamente la totalidad de las muestras con porosidades superiores al 18 % pertenecen a las dosificaciones HRF/AC12-35a y HRM/AC12, lo que confirma una excesiva aportación de agua durante el proceso de fabricación en la planta de hormigonado, en ambos casos. La dispersión de la serie patrón HM/AC12, se produce únicamente en términos de porosidad (oscilando entre el 12 y el 17 %), mientras que la densidad aparente permanece constante en el intervalo 2,20 - 2,25 g/cm³, idéntico al obtenido con las probetas moldeadas, hecho que demuestra que no se ha producido mezcla entre las dos dosificaciones (HM/AC12 y HRM/AC12) que componen el batch 3.

Resistencia a compresión

En la Tabla 4.14 se detallan los resultados de resistencia a compresión obtenidos a partir de las probetas moldeadas en planta. Por cada dosificación se han ensayado, a las edades de 7, 28, 90 y 365 días, 7 probetas (excepto la dosificación HM/AC12, con 5).

Dosificación	f _c (7 días)			f _c (28 días)			f _c (90 días)		f _c (365 días)	
	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	n	\bar{x}	n
HM/AC12	26,21	0,64	2	35,03	2,11	2	-	0	49,78	1
HRM/AC12	24,62	0,77	2	33,16	0,84	3	36,85	1	44,53	1
HRM/AC20	26,10	0,91	2	35,03	1,57	3	39,60	1	44,85	1
HRM/AC20+I	27,08	0,77	2	33,06	0,75	3	38,08	1	40,50 ¹	1
HRF/AC12-35a	20,39	0,06	2	27,23	0,50	3	31,53	1	34,78	1
HRF/AC12-35b	30,32	0,51	2	37,33	0,21	3	43,05	1	47,31 ¹	1
HRF/AC20-50	34,60	1,47	2	44,28	0,84	3	51,51	1	54,93 ¹	1

¹ Las probetas pertenecientes a las dosificaciones HRM/AC20+I, HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50 fueron ensayadas a los 375 días, en lugar de los 365 días

Tabla 4.14. Resistencia a compresión. (Datos: Probetas moldeadas en planta)

En las gráficas que componen la Figura 4.15 se presentan los resultados de resistencia a compresión en función del tiempo, diferenciando entre dosificaciones y la procedencia del elemento ensayado: probeta moldeada en planta (cuyos datos se han detallado en la Tabla 4.14) o testigo extraído del batache. Para facilitar el análisis, los resultados pertenecientes a las probetas moldeadas en planta, vienen representados a partir de la línea de tendencia obtenida a partir de los datos mostrados en la Tabla 4.14. Por su parte, los resultados de las probetas-testigo se expresan en función del valor medio y desviación estándar. Otro aspecto a resaltar, es la edad en la que fueron ensayadas las muestras. Mientras que las probetas fueron ensayadas a la edad de 7, 28, 90 y 365 días, los testigos se ensayaron a edades más avanzadas, entre los 375 y los 760 días, una vez los bataches fueron retirados de la obra.

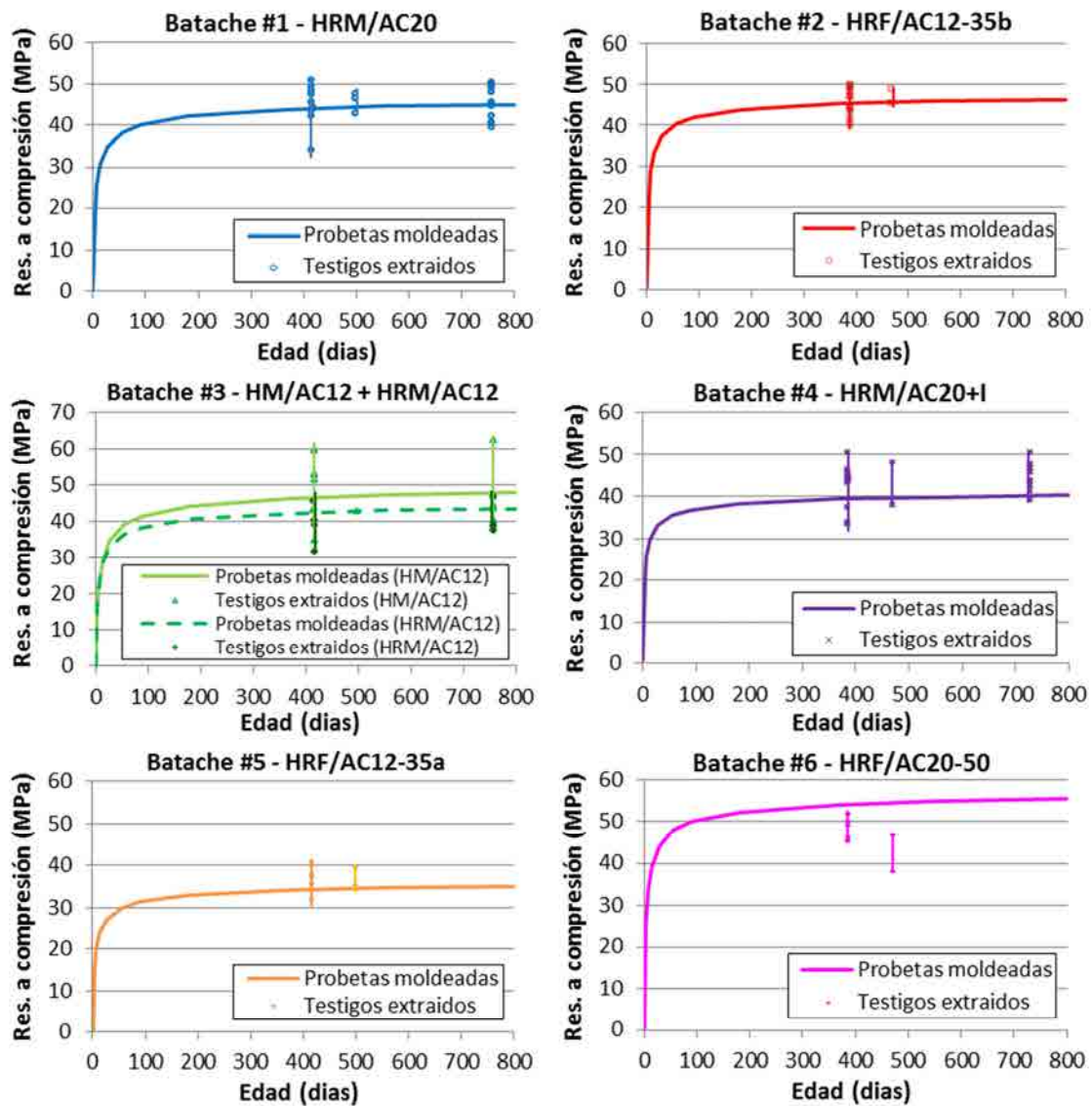


Figura 4.15. Influencia del proceso constructivo. Resistencia a compresión = $f(t)$.
a) Batache #1; b) Batache #2; c) Batache #3; d) Batache #4; e) Batache #5; f) Batache #6

El valor medio de resistencia a compresión se encuentra en línea con los obtenidos con las probetas moldeadas en planta, superando ampliamente los 30 MPa, y alcanzando en casos puntuales, los 50 MPa. Si bien es cierto que los resultados procedentes de los testigos presentan una mayor dispersión en el rango de resultados (de hasta 15 MPa), ésta no puede achacarse sólo al procedimiento constructivo, sino a un distinto proceso de curado (menos controlado). Cabe recordar que las probetas moldeadas en planta fueron almacenadas en cámara húmeda, en condiciones estables de humedad (100 %) y temperatura (25 °C) hasta su ensayo.

Únicamente los testigos pertenecientes al batache #6 (dosificación HRF/AC20-50), obtienen resistencias muy inferiores a las obtenidas con las probetas moldeadas. El hecho que las resistencias a 470 días sean inferiores a las obtenidas a 365 días, puede indicar la presencia de resultado(s) anómalo(s) debido a irregularidades geométricas generadas durante el despiece de los TCZ en alguno de los testigos, lo que provoca una cierta excentricidad de las cargas aplicadas durante el ensayo de resistencia a compresión. Concretamente, el testigo "6105B", apenas alcanza una resistencia de 38,2 MPa, que representa entre un 16 y un 26% inferior a la obtenida en el resto de muestras ensayadas.

Disposición (orientación de las fibras de acero)

Para analizar si el procedimiento constructivo empleado durante la prueba piloto, repercute sobre la disposición de las fibras de acero en los bataches de sostenimiento, en este apartado se van a comparar los resultados obtenidos al aplicar el método inductivo, sobre las probetas moldeadas (tanto en planta como en el LTE) y los testigos extraídos. Antes de presentar y analizar dichos resultados, en la Figura 4.16, se detalla el criterio adoptado para la identificación de los ejes:



- **Eje 1:** Eje vertical
- **Eje 2:** Eje horizontal, de dirección paralela al lado corto del batache
- **Eje 3:** Eje horizontal, de dirección paralela al lado largo del batache

Figura 4.16. Criterio de asignación de ejes. Nomenclatura

En la Figura 4.17, se presentan los resultados de las probetas moldeadas durante ambas campañas: planta y LTE Luis Agulló. El número total de muestras analizadas asciende a 18, pertenecientes a las tres dosificaciones de HRF: 2 probetas de HRF/AC12-35a, 8 probetas de HRF/AC12-35b y 8 probetas de HRF/AC20-50.

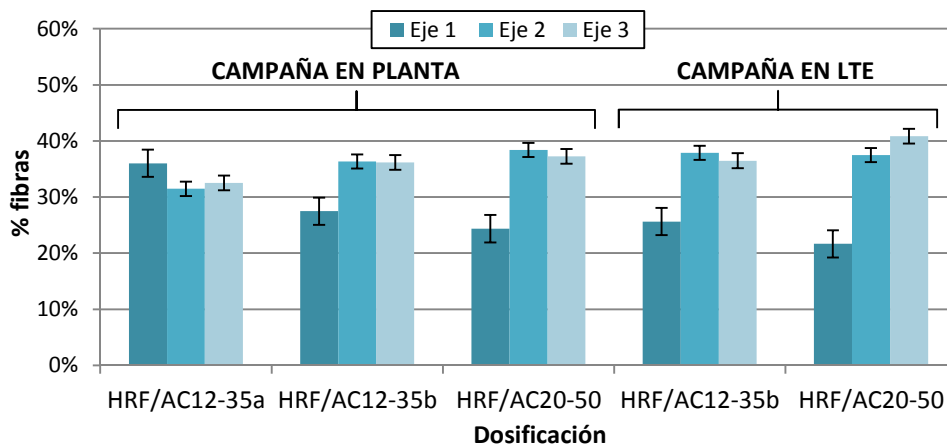


Figura 4.17. Orientación fibras. (Datos: Probetas moldeadas en planta y en LTE).

Puede apreciarse que en 16 de las 18 probetas analizadas, los resultados se encuentran en línea con los obtenidos anteriormente por Torrents *et al.* (2012). Entre un 70 y un 80 % de las fibras quedan orientadas en el plano horizontal (formado por los ejes 2-3), mientras que apenas un 20 - 25 % permanecen orientadas verticalmente (eje 1), independientemente del tipo de fibra empleada: M503, utilizada en la fabricación de las dosificaciones HRF/AC12-35a y HRF/AC12-35b, o M502, utilizada en la dosificación HRF/AC20-50. Los dos casos en que no se cumple el comportamiento esperado *a priori* pertenecen a las muestras pertenecientes a la dosificación HRF/AC12-35a, donde el porcentaje de fibras orientadas verticalmente asciende hasta un 35 %.

Para completar el análisis, en la Figura 4.18 se presentan los resultados relativos a la orientación de las fibras de acero en los tres bataches pertenecientes a la prueba piloto, fabricados con HRF (identificados como #2, #5 y #6). Para su obtención se ha aplicado el método inductivo sobre 46 testigos cúbicos de 150 mm, obtenidos a partir de los 18 testigos prismáticos ensayados previamente a flexotracción (6 por cada dosificación de HRF), siguiendo el plan de corte descrito en la Figura 3.19 (presentada en el capítulo 3), y adjunto en mayor detalle en el ANEJO B.

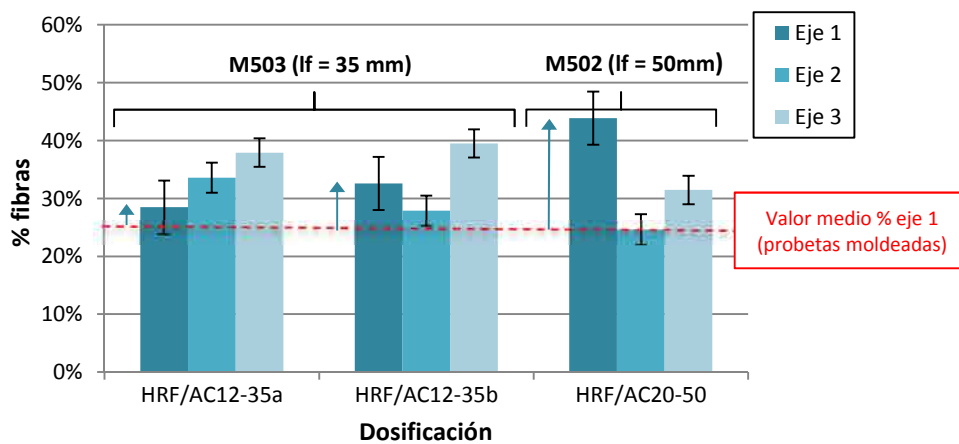


Figura 4.18. Orientación de fibras en bataches. (Datos: Testigos cúbicos 150 mm)

El porcentaje de fibras orientadas verticalmente (eje 1) aumenta en los tres casos analizados, respecto los resultados obtenidos con las probetas moldeadas (detallados en la Figura 4.17), donde suponían entre el 20-25 % del total. El mayor incremento se produce en las muestras pertenecientes al batache #6, reforzado con el tipo de fibra de mayor longitud M502 (dosificación HRF/AC20-50), donde las fibras orientadas verticalmente representan el 43,9 % del total, alcanzando en uno de los testigos, hasta el 48 %.

El hecho que las tres dosificaciones analizadas obtuvieron una consistencia en planta prácticamente idéntica (tal y como se mostraba en la Figura 4.7), indica que el mayor % de fibras verticales presente en el batache #6 respecto a los otros dos casos (#2 y #5) no se debe a una diferente fluidez en el hormigón, sino al empleo de una tipología de fibra de mayor longitud.

De la comparativa realizada entre los resultados pertenecientes a las probetas moldeadas (Figura 4.17) y testigos extraídos de los bataches (Figura 4.18) se extrae la siguiente conclusión: el procedimiento constructivo empleado altera la distribución de fibras dentro del elemento estructural, incrementando el % de fibras orientadas verticalmente.

Tal y como demostró Blanco (2013), las fibras de acero tienden a orientarse según la dirección del flujo, especialmente en secciones reducidas (ej. tuberías). En el caso de ejecutar un elemento de cimentación con cubilote y tubo tremie, la dirección de vertido viene predeterminada, en sentido vertical. A medida que el hormigón autocompactante fluye libremente rellenando la zanja excavada, siguiendo el esquema mostrado anteriormente en la Figura 4.13, la disposición final de las fibras viene condicionada por su capacidad de rotación en el tramo recorrido desde el extremo del tubo tremie hasta su posición final. Por tanto, la disposición de las fibras en el batache, depende fundamentalmente de tres factores:

1. Consistencia del hormigón: cuanto más fluido sea el hormigón, menor es la resistencia ofrece el flujo, y por tanto, las fibras tendrán una mayor capacidad de rotación y orientarse según la dirección del flujo.
2. Geometría de las fibras: cuanto mayor sea la longitud de la fibra, menor capacidad de giro, y por tanto y mayor porcentaje de fibras quedan dispuestas verticalmente.
3. Dimensiones del batache: cuanto mayor sea el batache, mayor distancia debe recorrer la fibra, y por tanto, mayor probabilidad de giro.

Una vez comprobado que el porcentaje de fibras orientadas verticalmente en los testigos procedentes de los bataches es mayor en comparación con el habitual en probetas moldeadas, a continuación va a verificarse si la disposición de fibras en los bataches ejecutados es uniforme, o bien presenta un cierto grado de segregación (Orbe, 2013)

Para ello, en la Tabla 4.15 y Tabla 4.16 se presentan el contenido de fibras, y el porcentaje de éstas orientadas verticalmente (eje 1), respectivamente, tras aplicar el método inductivo sobre los testigos extraídos de los bataches. Debe especificarse que los resultados presentados proceden de dos tipologías de testigos diferentes: 46 testigos cúbicos de 150 mm (ya analizados en la Figura 4.18), y por otro, 32 testigos cilíndricos 90 x 90 mm obtenidos del despiece de los dos TCZ extraídos para cada batache (TCZ₁ y TCZ₂)

En ambas tablas, los resultados se agrupan en función de tres variables: batache (#2, #5 y #6), tipo de testigo (TP, TCZ₁ y TCZ₂), y cota (superficial, intermedia o profunda). De este modo puede analizarse la variabilidad de ambos parámetros, tanto en dirección vertical (eje 1) como horizontal (eje 3), dentro del mismo elemento estructural.

Zona	Batache #2			Batache #5			Batache #6		
	TP	TCZ 1	TCZ 2	TP	TCZ 1	TCZ 2	TP	TCZ 1	TCZ 2
Superficial	20,5	22,6	17,0	12,7	17,0	15,6	16,9	19,8	16,6
Intermedia	20,9	19,4	17,1	14,0	16,2	18,7	17,8	24,1	23,1
Profunda	18,2	16,3	22,1	13,6	19,3	12,1	19,1	23,6	21,2
# muestras	19	6	5	14	6	5	13	5	5

Tabla 4.15. Contenido de fibra en los bataches, según su localización (en kg/m³)

Zona	Batache #2			Batache #5			Batache #6		
	TP	TCZ 1	TCZ 2	TP	TCZ1	TCZ 2	TP	TCZ 1	TCZ 2
Superficial	34,1	32,8	49,1	25,7	35,4	28,3	41,6	41,9	45,3
Intermedia	29,5	43,4	43,3	29,9	28,6	35,1	44,4	51,2	48,3
Profunda	32,7	43,5	21,8	30,3	20,5	34,9	44,7	52,6	53,4
# muestras	19	6	5	14	6	5	13	5	5

Tabla 4.16. % fibras orientadas verticalmente (eje 1) en los bataches, según su localización

Los resultados mostrados en ambas tablas confirman una distribución homogénea de las fibras en los bataches. Analizando los datos de contenido de fibra, las diferencias obtenidas entre los valores extremos (mínimo y máximo) son de 5,8, 7,2 y 7,5 kg/m³, y medias cercanas al contenido teórico de 20 kg/m³.

En cuanto al % de fibras orientadas verticalmente, se observa un comportamiento diferente dependiendo del batache analizado. Mientras que en el batache #6, el % de fibras permanece constante, con valores situados entre el 42 y el 53 % del total, en el batache #2 se obtienen valores tan distantes como del 22 al 49 %. El valor mínimo (21,8 %) se obtiene con las muestras extraídas del TCZ 2, situadas en las cotas profundas y alejadas del eje del batache #2. Ello puede responder al flujo mayoritariamente horizontal del hormigón que rellena el tramo más profundo del batache, junto con la mayor capacidad de giro de las fibras de menor longitud M503, con el que está reforzado el bataches #2.

Otro de los factores que influyen sobre la disposición de las fibras en el batache, es el denominado efecto pared. Tal y como demostró Blanco (2013), las fibras tienden a orientarse de forma paralela al encofrado, o en nuestro caso particular, a la superficie lateral de la zanja (eje 3). En la Tabla 4.17, se compara la orientación de las fibras en las probetas cúbicas extraídas de la fragmentación de los testigos prismáticos, diferenciando entre las probetas situadas en la zona central del batache, respecto a las situadas en la superficie de contacto entre terreno-estructura.

Zona	Batache #2			Batache #5			Batache #6		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 1	Eje 2	Eje 3
Central	28,5	34,5	37,1	28,9	34,8	36,3	45,1	31,9	23,0
Extrema	38,4	22,5	39,1	34,0	27,1	38,5	44,0	22,4	33,5
Conjunto	32,7	29,4	37,9	30,3	32,9	36,8	44,7	28,1	27,2

Tabla 4.17. Influencia del efecto pared sobre la orientación de las fibras (Testigos cúbicos)

En nuestro caso, se detecta un ligero incremento de las fibras de acero orientadas según el eje 3, en las proximidades de la superficie de contacto con el terreno (zona extrema). Tal y como se detalla en las gráficas de la Figura 4.19, el efecto pared se produce con mayor intensidad en el batache #5 (dosificación HRF/AC12-35a) que en el batache #6 (dosificación HRF/AC20-50). Ello puede confirmar la hipótesis planteada anteriormente, las fibras M503, de menor longitud, tienen mayor capacidad de rotación, lo que favorece a que un mayor % de ellas pueda alinearse con el flujo.

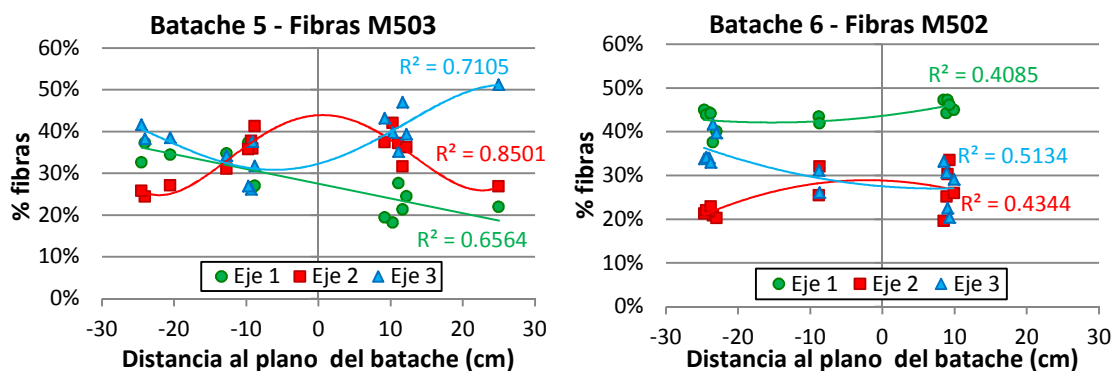


Figura 4.19. Influencia del tipo de fibra sobre el efecto pared

4.6 DECANTACIÓN EN ALTURA

Una de las características a garantizar en un elemento estructural es que el hormigón sea lo más homogéneo posible. Este hecho resulta especialmente importante en cimentaciones, tales como pilotes o pantallas, ya que, además de la imposibilidad de

realizar una inspección visual del elemento una vez ha sido ejecutado, el riesgo de segregaciones o decantaciones debidas al peso propio es más probable.

A lo largo del apartado, y a partir de las muestras obtenidas del despiece los testigos cilíndricos longitudinales (TCZ), va a analizarse la variabilidad de propiedades físicas (densidad, contenido de fibras, velocidad de ultrasonidos) y mecánicas (resistencia a compresión y módulo de elasticidad). Para visualizar con mayor claridad los resultados obtenidos, estos se presentan agrupados en función del tipo de hormigón: por un lado las dosificaciones HM y HRM, y por otro las dosificaciones con fibras de acero HRF.

Además de la representación gráfica, los resultados se complementan con el análisis estadístico realizado sobre éstos, descomponiendo el batache en tres zonas: superficial ($z < 0,5$ m), intermedia ($0,5 < z < 1,5$ m) y profunda ($z > 1,5$ m), y mostrando el valor medio (\bar{x}) y la desviación estándar (σ) del parámetro analizado, junto con el número de muestras (n) ensayadas.

Dado que las muestras analizadas no son probetas normalizadas, sino que han sido obtenidas a partir del despiece de testigos, un tema a considerar es el criterio de aceptación o rechazo de una muestra, o mejor dicho del resultado obtenido de ella. Para ello, se ha optado por aplicar el denominado Test Q de Dixon.

4.6.1 Peso específico - densidad = $f(z)$

En la Figura 4.20 se presentan la variación del peso específico en función de la profundidad o cota del batache. Los rangos obtenidos son prácticamente idénticos a los obtenidos con las probetas moldeadas (Figura 4.2 y Figura 4.8), oscilando entre 2,25 y 2,30 para el hormigón patrón HM, entre 2,05 y 2,15 para las dosificaciones de HRM y entre 2,05 y 2,20 para las dosificaciones HRF.

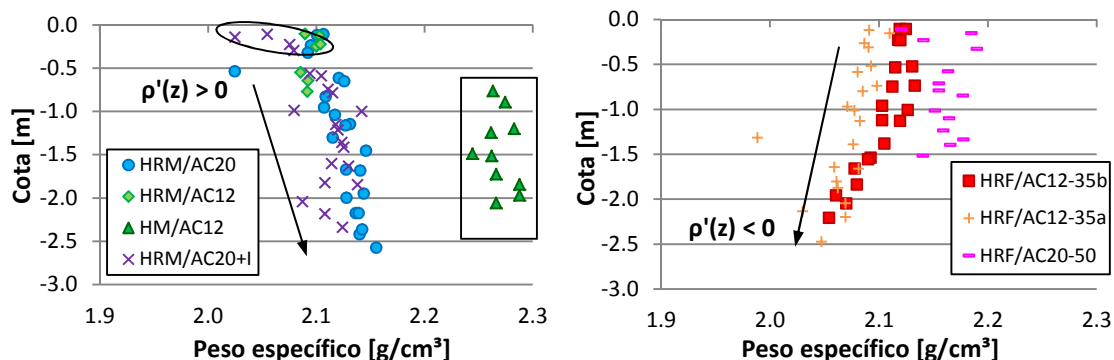


Figura 4.20. Decantación en altura. Peso específico = $f(z)$. a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF

En la Tabla 4.18 se presentan los resultados estadísticos correspondientes a las de las gráficas mostradas en la Figura 4.20.

Dosificación	Zona superficial ($z < 0,5$ m)			Zona intermedia ($0,5$ m $< z < 1,5$ m)			Zona profunda ($z > 1,5$ m)		
	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n
HM/AC12	-	-	-	2,265	0,013	5	2,274	0,011	5
HRM/AC12	2,099	0,006	4	2,090	0,003	3	-	-	-
HRM/AC20	2,099	0,006	4	2,122	0,011	9	2,139	0,008	9
HRM/AC20+I	2,059	0,022	4	2,114	0,017	9	2,116	0,016	7
HRF/AC12-35a	2,094	0,009	4	2,083	0,008	8	2,060	0,015	8
HRF/AC12-35b	2,120	0,003	4	2,116	0,011	9	2,075	0,013	7
HRF/AC20-50	2,159	0,029	4	2,163	0,009	9	2,140	-	1

Tabla 4.18. Decantación en altura. Peso específico = $f(z)$. Datos estadísticos

A partir de los resultados mostrados, tanto en la Figura 4.19 como en la Tabla 4.18, pueden extraerse tres comportamientos a remarcar:

1. No se ha producido mezcla entre los dos hormigones con los que se ejecutó el batche #3. La segregación entre ambas dosificaciones puede verse favorecida por el orden de vertido. Tal y como se describió con anterioridad en la Figura 4.13, la dosificación patrón HM/AC12, más densa y vertida en primer lugar, permanece en el fondo de la zanja, mientras que la dosificación HRM/AC12, menos densa debido al árido reciclado, y vertida posteriormente, completa los 0,8 – 0,9 metros más superficiales.
2. En el batche #4 (dosificación HRM/AC20+I) se produce un brusco descenso de la densidad en los 20 – 30 cm más superficiales. Este comportamiento no se detecta en el resto de batches ejecutados, por lo que puede indicar una acumulación puntual de finos (al tratarse del hormigón que se vierte con los últimos restos del camión). Esta hipótesis queda confirmada con los datos de resistencia y módulo de elasticidad que se muestran posteriormente.
3. Se obtiene un comportamiento totalmente opuesto entre los batches fabricados con dosificaciones de HRM respecto los de HRF. Mientras que los batches de HRF, 2 y 5 son ligeramente más densos en superficie, en los batches HRM existe una tendencia a aumentar la densidad a medida que se profundiza en el batche, probablemente como consecuencia de la compactación debida al propio peso del hormigón.

4.6.2 Velocidad de ultrasonidos = $f(z)$

En la Figura 4.21 y Tabla 4.19 se muestran los resultados de velocidad de ultrasonidos para cada una de las dosificaciones. Los valores obtenidos se mantienen constantes en todo el batche, sin una tendencia clara de variación en altura.

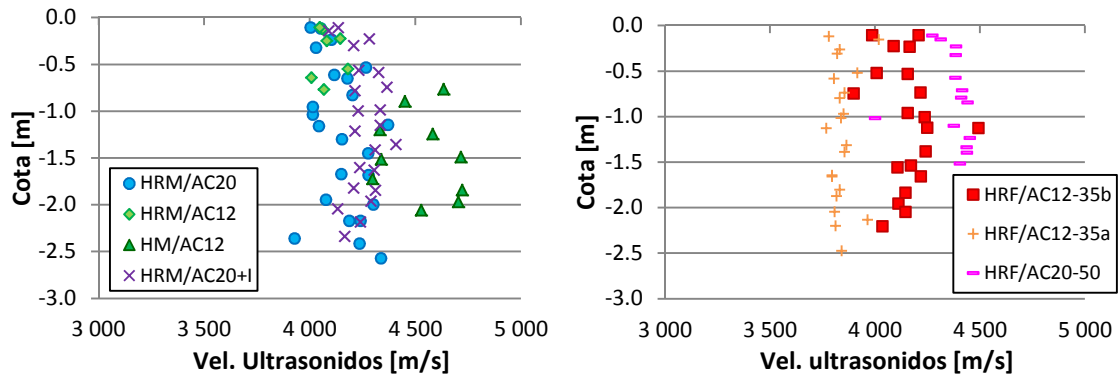


Figura 4.21. Decantación en altura. Vel ultrasonidos=f(z). a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF

Dosificación	z < 0,5 m			0,5 m < z < 1,5 m			z > 1,5 m		
	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n
HM/AC12	-	-	-	4543	136,2	4	4518	177,2	5
HRM/AC12	4083	37,0	4	4085	72,0	3	-	-	-
HRM/AC20	4048	36,6	4	4164	113,6	10	4193	119,7	9
HRM/AC20+I	4178	73,2	4	4293	68,4	9	4236	60,9	8
HRF/AC12-35a	3862	91,8	4	3842	38,2	9	3832	51,8	8
HRF/AC12-35b	4112	84,1	4	4184	157,0	9	4133	53,3	7
HRF/AC20-50	4339	48,3	4	4378	117,3	8	4404	-	1

Tabla 4.19. Decantación en altura. Vel ultrasonidos = f(z). Datos estadísticos

Las muestras pertenecientes a la dosificación patrón alcanzan las mayores velocidades de pulso ultrasónico, con valores entre 4400 y 4700 m/s. El resto de dosificaciones de HRM/HRF se sitúan en el rango entre 4000 y 4500 m/s, excepto la dosificación HRF/AC12-35a, que alcanza valores inferiores a 4000 m/s, correspondiendo con la serie de menor densidad, tal como se ha visto con anterioridad (Figura 4.20).

La diferencia existente, en términos de velocidad de ultrasónicos, entre la dosificación patrón HM/AC12 y las dosificaciones HRM y HRF, resulta ser muy inferior al obtenido con el resto de propiedades analizadas, con una reducción de entre el 3,0 y el 15,6 %. Ello responde a la dependencia de la velocidad de ultrasónicos de propiedades del hormigón, como el módulo de elasticidad dinámico y la densidad del hormigón, tal y como se detalla en la expresión [4.13], obtenida por Jones (1962).

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \tag{4.13}$$

donde: v_p : Velocidad de onda longitudinal, (en m/s).

- E_d : Módulo de elasticidad dinámico del hormigón (en MPa)
 ρ : Densidad del hormigón (en g/cm³)
 ν : Coeficiente de Poisson [-]

De la expresión [4.13], se deduce que la velocidad de onda depende directamente del módulo de elasticidad dinámico y de un factor que depende del coeficiente de Poisson, y es inversamente proporcional a la densidad. En las dosificaciones HRM, el menor módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson reducen notablemente el valor de ν_p , en cambio, la menor densidad habitual en HRM, hacen aumentar la velocidad de ultrasonidos.

Lo comentado en el párrafo anterior se confirma con las mayores velocidad de ultrasonidos obtenidas en las dosificaciones con tamaño máximo de árido de 20 mm: HRM/AC20; HRM/AC20+I y HRF/AC20-50, tanto en las series con fibras o sin fibras, respecto las dosificaciones con tamaño máximo de árido de 12 mm: HRM/AC12; HRF/AC12-35a y HRF/AC12-35b. Ello refleja la dependencia directa entre velocidad de ultrasonidos y módulo de elasticidad, mostrada en la expresión [4.13].

4.6.3 Resistencia a compresión = f (z)

En la Figura 4.22 y Tabla 4.20 se presentan los resultados de resistencia a compresión obtenidos de los 107 testigos ensayados. Se observa una elevada dispersión, con la mayor parte de los datos en el rango comprendido entre los 30 y los 50 MPa, alcanzando máximos cercanos a los 60 MPa, en las cotas más profundas del batache #3, correspondiente a la dosificación patrón HM/AC12. En la zona más superficial de los bataches #4 (dosificación HRM/AC20+I) y #5 (HRF/AC12-35a) se obtienen resistencias entre 5 y 10 MPa inferiores a las obtenidas en el resto del batache correspondiente. Ello puede deberse a una mayor presencia de finos en superficie.

En cualquier caso, a pesar de la dispersión obtenida, y de la acumulación de finos detectadas, las 107 muestras obtenidas alcanzan una resistencia superior a los 25 MPa exigidos habitualmente en estructuras de cimentación.

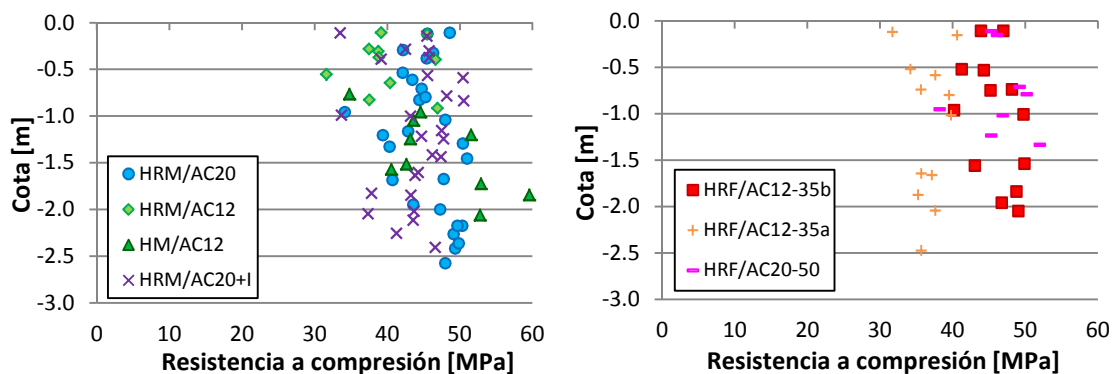


Figura 4.22. Decantación en altura. Res. compresión =f(z). a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF

Dosificación	z < 0,5 m			0,5 m < z < 1,5 m			z > 1,5 m		
	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n
HM/AC12	-	-	-	40,92	7,03	5	49,41	9,29	6
HRM/AC12	36,53	5,88	6	35,70	4,96	6	-	-	-
HRM/AC20	42,91	6,08	5	40,96	5,78	12	43,22	4,58	10
HRM/AC20+I	37,11	4,65	6	42,53	4,58	8	39,39	3,83	9
HRF/AC12-35a	36,16	4,46	2	37,33	2,18	5	36,25	0,93	5
HRF/AC12-35b	45,44	1,55	2	44,83	3,43	6	47,52	2,46	5
HRF/AC20-50	45,70	0,39	2	46,99	4,47	6	-	-	-

Tabla 4.20. Resistencia a compresión = f(z)

4.6.4 Módulo de elasticidad = f(z)

En la Figura 4.23 y Tabla 4.21 se presentan los módulos de elasticidad obtenidos a partir del ensayo de 72 testigos.

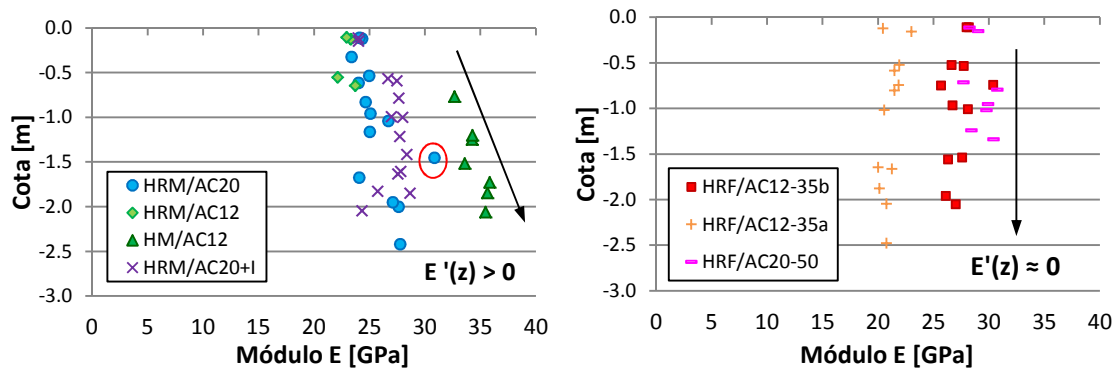


Figura 4.23. Decantación en altura. Módulo E = f(z). a) Dosif. HM y HRM; b) Dosif. HRF

Dosificación	z < 0,5 m			0,5 m < z < 1,5 m			z > 1,5 m		
	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n
HM/AC12	-	-	-	33739	763	3	35142	898	4
HRM/AC12	23127	189	2	22933	785	2	-	-	-
HRM/AC20	23963	397	3	25922	2518	7	26670	1506	4
HRM/AC20+I	23987	20	2	27565	578	6	26828	1568	5
HRF/AC12-35a	21719	1284	2	21450	486	5	20570	451	5
HRF/AC12-35b	28089	99	2	27545	1491	6	25873	1857	5
HRF/AC20-50	28649	393	2	29501	1088	6	-	-	-

Tabla 4.21. Módulo de elasticidad = f(z)

Los mayores valores de E , se obtienen en la dosificación patrón HM/AC12, y se sitúan entre los 32,6 y los 35,8 GPa, mientras que el resto de dosificaciones alcanzan módulos comprendidos entre 20 y 30 GPa. Se observa que en los bataches de HRM existe una tendencia a incrementar el módulo a medida que se profundiza en el terreno ($E'(z) > 0$), probablemente debido a la mayor compactación de las cotas profundas de los bataches. En cambio, los bataches de HRF mantienen un comportamiento homogéneo ($E'(z) \approx 0$), con módulos de elasticidad prácticamente constantes.

4.6.5 Contenido de fibras – resistencia residual a flexión = $f(z)$

En la Figura 4.24 se muestran la variación del contenido de fibra en función de la cota, en los tres bataches de HRF. Estos resultados se han obtenido a partir de aplicar el método inductivo sobre los 32 testigos cilíndricos 90 x 90 mm (Figura 4.23a) y 46 testigos cúbicos 150 x 150 mm (Figura 4.23b), obtenidos del despiece de los testigos cilíndricos longitudinales (TCZ) y los testigos prismáticos (TP), respectivamente.

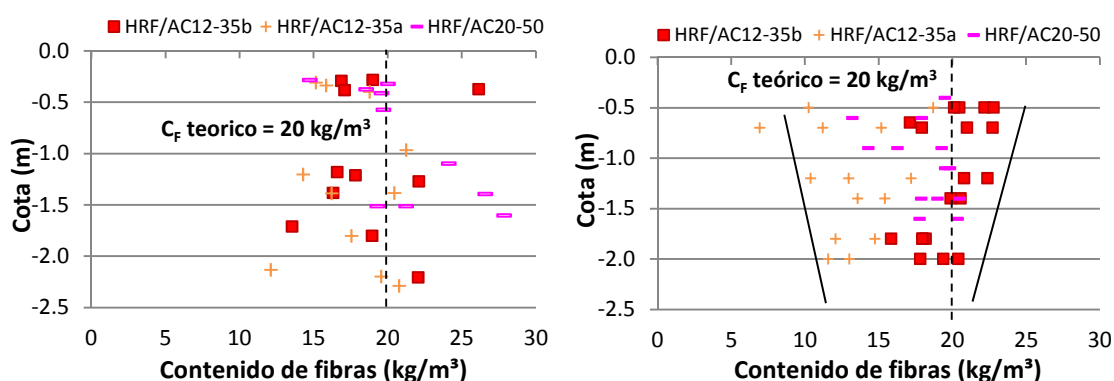


Figura 4.24. Decantación en altura. Contenido de fibras = $f(z)$.
(Datos empleados: a) Testigos cilíndricos, b) Testigos cúbicos)

El contenido medio de fibras es prácticamente idéntico al contenido teórico (20 kg/m^3), tanto en los testigos cilíndricos ($19,0 \text{ kg/m}^3$), como en los testigos cúbicos ($17,0 \text{ kg/m}^3$), obteniendo valores mínimos y máximos de 7 y 28 kg/m^3 , respectivamente. La dispersión observada es moderada en los tres casos analizados, con desviaciones estándar de entre 2 y $4,5 \text{ kg/m}^3$.

Los resultados de contenido de fibra mostrados en la Figura 4.24 pueden relacionarse con los resultados del ensayo de flexotracción realizado sobre 18 testigos prismáticos $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$ (6 por dosificación de HRF), distribuidos en grupos de dos, según su cota: superficial, intermedia y profunda, y cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.22.

El límite de proporcionalidad (f_{LOP}) obtenido varía entre los 1,90 MPa pertenecientes a las cotas profundas del batache #5 (Dosificación HRF/AC12-35a) y los 3,80 MPa obtenido en las cotas intermedias del batache #6 (Dosificación HRF/AC20-50).

Estas resistencias a flexotracción son muy inferiores a las obtenidas con las probetas moldeadas en planta, y mostradas anteriormente en la Tabla 4.11, donde alcanzaban valores comprendidos entre los 4,7 y los 5,7 MPa. Esta reducción puede deberse a las excentricidades generadas en el ensayo de flexotracción de los testigos prismáticos, debido al no paralelismo de los cortes realizados durante el despiece de los bataches.

Dosificación	z < 0,5m			0,5 m < z < 1,5 m			z > 1,5 m		
	f _{LOP}	f _{R,1}	f _{R,4}	f _{LOP}	f _{R,1}	f _{R,4}	f _{LOP}	f _{R,1}	f _{R,4}
HRF/AC12-35a (Batache #5)	2,76	1,01	0,67	2,48	0,68	0,30	1,90	0,64	0,28
HRF/AC12-35b (Batache #2)	2,74	0,20	0,10	3,12	0,52	0,26	3,33	1,09	0,80
HRF/AC20-50 (Batache #6)	3,05	0,25	-	3,78	0,28	0,27	3,21	1,74	1,50

Tabla 4.22. Resistencia residual = $f(z)$. (Datos: Testigos prismáticos)

Otro de los aspectos a remarcar es la falta de refuerzo (fibras) en 5 de los 18 testigos, ocasionando la rotura frágil de la muestra de forma previa a alcanzar la abertura de fisura de 3,5 mm. Concretamente, este hecho se ha producido en los dos testigos correspondientes a las cotas superficiales del batache #2 y en tres correspondientes al batache #6. Un hecho que puede explicar la baja resistencia residual obtenida es el efecto pared, que tiende a orientar las fibras de forma paralela a la superficie lateral de la zanja, y por ende, reduce notablemente el % de fibras “efectivas” orientadas según el eje 2.

Por el contrario, las mayores resistencias residuales se obtienen con los testigos pertenecientes a las cotas profundas del batache #6 (dosificación HRF/AC20-50), reforzado con las fibras de mayor longitud M502.

4.7 CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados y analizados a lo largo del presente capítulo, a continuación se enuncian las conclusiones extraídas del mismo:

Relativas a la influencia del árido reciclado

- Es factible conseguir consistencias autocompactantes en hormigones con la fracción gruesa 100% árido reciclado.
- La densidad de este tipo de hormigones se reduce de forma lineal en función del contenido de árido reciclado respecto un hormigón autocompactante convencional (con áridos naturales). Para los áridos reciclados utilizados durante las campañas experimentales, la reducción se sitúa alrededor de los 0,04 g/cm³ por cada 100 kg.

- La resistencia a compresión y módulo de elasticidad se reducen, en este tipo de hormigones, entre un 30 y un 40 % respecto a la dosificación patrón. Sin embargo, los valores alcanzados: 35-40 MPa de resistencia a compresión a 28 días; y módulos de elasticidad entre los 23 y 30 GPa, hacen totalmente viable su uso en numerosas aplicaciones estructurales.
- Se propone una modificación de las expresiones ya existentes que relación f_c y E , con el fin de adaptarla a esta tipología de hormigones. El factor reductor $\widehat{\alpha}_{AR}$, depende linealmente del contenido de árido reciclado, según las expresiones [4.10] y [4.11].
- La relación entre resistencia a flexión y compresión, propuesta por la instrucción EHE-08, es válida.

Relativas a la influencia de las fibras de acero

- Es factible conseguir consistencias autocompactantes en hormigones con la fracción gruesa compuesta al 100 % por árido reciclado, y 20 kg/m³ de fibras de acero M503, realizando ligeras modificaciones sobre el esqueleto granular (incrementando el contenido de finos) y aumentando en 0,5 l/m³ el contenido de aditivo superplastificante.
- La utilización de fibras de mayor longitud (M502) dificulta la obtención de consistencias autocompactantes.
- Tanto las propiedades físicas (porosidad/densidad) como mecánicas (res. compresión/ módulo E), no se ven alteradas significativamente por la adición de 20 kg/m³ de fibras de acero.

Relativas al método de pre-saturación de los áridos reciclados

- El método de pre-saturación con agua funciona correctamente. Realizando una caracterización de los áridos reciclados, puede calcularse de forma precisa, el contenido de agua de saturación a aportar. Sin embargo, un exceso del agua de saturación añadida, conlleva unas peores prestaciones mecánicas (mayor porosidad) del hormigón en estado endurecido.
- El método de pre-saturación empleando el aditivo inhibidor de la absorción no ha funcionado correctamente. El contenido predeterminado e igual a 0,23 % sobre el peso de árido reciclado ha sido insuficiente para alcanzar consistencias autocompactantes.

Relativas a la influencia del procedimiento constructivo

- Si bien presentan una mayor dispersión, tanto las propiedades físicas como mecánicas no se ven influenciadas negativamente por el transporte y puesta en obra de los hormigones.
- El modo de vertido (en sentido vertical) influye sobre la disposición final de las fibras de acero en el batache. A mayor longitud tengan las fibras, mayor proporción de éstas permanece colocada en dirección vertical. Mientras que en las probetas moldeadas en planta este porcentaje apenas supone el 20 - 25 % del total, en los batches #2 y #5 (fibras M503; $l_f = 35$ mm) supone el 30 %, mientras que en el batache #6 (fibras M502; $l_f = 50$ mm) se alcanza el 43,4 %.

Relativas a la decantación en altura

- No existe mezcla entre hormigones en el batache #3, compuesto por dos dosificaciones: HM/AC12, sin árido reciclado; y HRM/AC12, con árido reciclado.
- Se tiene un comportamiento opuesto entre batches de HRM y HRF. Los primeros son más densos en las cotas más profundas (debido a la compactación por peso propio); los segundos son homogéneos.
- En los batches #4 y #5, se detecta una acumulación de finos en superficie. Ello supone una reducción en los valores de propiedades como la densidad, resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

ENSAYO DE LOSAS

5.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a lo indicado en el Capítulo 3, uno de los objetivos fundamentales de las campañas experimentales desarrolladas fue comprobar la aplicación estructural del hormigón autocompactante reforzado con fibras y con una fracción gruesa compuesta al 100% por árido reciclado mixto. Para ello, era necesario realizar una prueba piloto, la cual fue posible realizarla en las obras de un aparcamiento subterráneo en la calle Badajoz (Barcelona). La prueba consistió en ejecutar seis bataches de sostenimiento con dicho hormigón. Los bataches, una vez ejecutados, fueron extraídos y divididos en dos mitades, para facilitar su transporte.

De esas dos mitades, una se utilizó para extraer testigos de diversa tipología y orientaciones (los resultados de los mismos se han presentado en el Capítulo 4), mientras que la otra se planteó para estudiar el comportamiento estructural, mediante el ensayo a flexión de las losas extraídas de esta parte del batache. Con el fin de obtener, por un lado, un mayor número de losas y, por otro, poder analizar distintas variables, relativas tanto a la geometría como al sistema constructivo, a la parte izquierda de cada uno de los seis bataches, se le aplicaron dos cortes con hilo de diamante, tal y como se muestra en la Figura 5.1. De esta forma, se obtuvieron tres losas por cada batache, identificadas como: superior "S", central "C" e inferior "I".

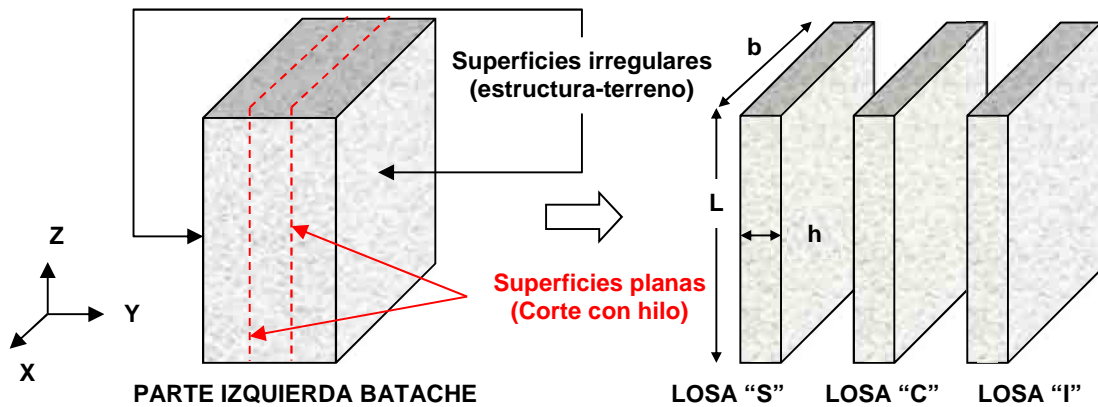


Figura 5.1. Proceso de obtención de losas. Plan de corte

La principal diferencia existente entre ellas es su regularidad superficial. Mientras que la losa central "C" tiene ambas caras planas, resultantes de los cortes aplicados, las losas externas, "S" e "I", únicamente tienen una cara plana, en tanto que la irregularidad de la cara restante viene determinada por la rugosidad del contacto entre la estructura de contención y el terreno adyacente a la zanja donde se vertió el hormigón.

Para que dicha irregularidad superficial no afecte negativamente sobre los ensayos a realizar, se toma la siguiente decisión: la losa a ensayar se coloca de forma tal, que el contacto entre los caballetes de apoyo y la losa se produzca sobre la cara plana. Consecuentemente, en las doce losas "S" e "I" donde la carga actúa sobre la superficie irregular, es necesario realizar un tratamiento previo de regularización.

El **objetivo** del presente capítulo es presentar los resultados obtenidos del ensayo de las losas y estudiar el comportamiento estructural de éstas, analizando la influencia de diversas variables, tales como la geometría, las propiedades mecánicas del hormigón o el contenido y orientación de las fibras, sobre los mismos.

Todo ello se hace en base a las 18 losas ensayadas, de las cuales, nueve son de HRF (las correspondientes a los batches #2, #5 y #6), mientras que las nueve restantes son de hormigón en masa (batches #1, #3 y #4).

5.2 ESQUEMA DEL ENSAYO DE FLEXIÓN

El objetivo básico de los ensayos planificados es analizar el comportamiento estructural de un muro-pantalla sometido a las cargas habituales en este tipo de estructuras. Dada la imposibilidad de reproducir (con el equipamiento actual del laboratorio LTE Luis Agulló de la UPC) las condiciones de contorno reales, tales como ensayar el batache integro, el empuje de tierras, restricciones de movimiento, etc., se decidió simplificar el ensayo.

La configuración del ensayo realizado es el de losa biapoyada en sus extremos, sometida a un cuchillo de carga actuando sobre toda la anchura de la sección centro luz. La carga, aplicada mediante un pistón hidráulico, se ha distribuido en todo el ancho de la losa, a través de una viga de reparto (perfil HEB) de 2 metros de longitud y 30 cm de ancho. Para garantizar que el contacto entre la losa y los caballetes de apoyo y entre la losa con la viga de carga, sea estable y homogéneo, se han colocado bandas de neopreno de 20 cm de ancho y 2 cm de espesor. Por último, para registrar los desplazamientos verticales producidos y la abertura de la(s) fisura(s) generada(s) durante el ensayo, se han instalado sobre la superficie de la losa 14 transductores de desplazamientos (LVDT's).

La expresión [5.1] establece la condición que toda sección o elemento estructural debe satisfacer, para garantizar que cumple con el estado límite último (ELU).

$$R_u \geq S_u \quad [5.1]$$

donde: R_u : Valor de la respuesta estructural

S_u : Valor de las solicitaciones

Los dos términos de la expresión [5.1] dependen, a su vez, de una serie de variables de cálculo. En la Figura 5.2, junto con el esquema general del ensayo, se identifican dichas variables, así como el criterio adoptado relativo a los ejes de referencia, tomando como $z = 0$, la sección del apoyo más superficial. El hecho de que la respuesta estructural varíe en cada losa, dependiendo, además, del estado de la misma (fisurada o no fisurada), hace necesario plantear el análisis de forma general, particularizando según el caso, en función las características propias de cada losa.

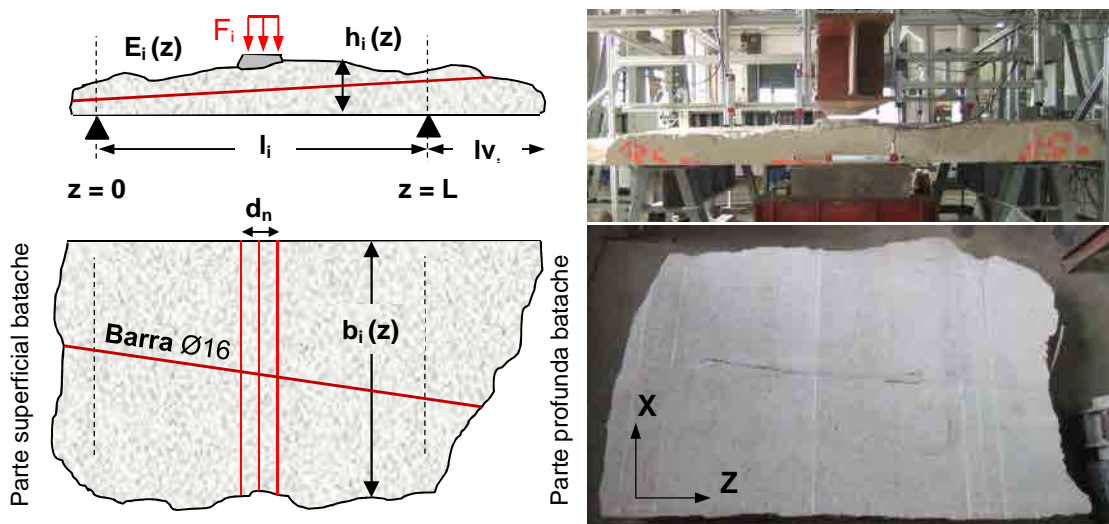


Figura 5.2. Esquema general del ensayo. Determinación de las variables principales

Las variables a considerar, tal como se muestra en la Tabla 5.1, pueden agruparse en dos categorías, en función de si inciden sobre la respuesta estructural de la losa (R) o

sobre las solicitaciones actuantes sobre la losa (S). En ambos casos, están relacionadas con aspectos como las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con el cual se ejecutó la estructura, la geometría de las losas y otras variables, como la presencia de barras de acero (inseridas en el hormigón para facilitar el izado y retirada del batache), o el mortero de nivelación aplicado sobre la superficie de las losas “S” e “I”, necesario para garantizar una distribución homogénea de la carga.

	Variables de cálculo	Parámetro
Respuesta estructural (R)	Propiedades físico-mecánicas (Apartado 5.3.1)	Módulo elasticidad (E)
		Resistencia a flexotracción (F_{LOP})
		Resistencia residual ($f_{R,i}$)
	Geometría de la losa (Apartado 5.3.2)	Espesor de losa (h)
		Anchura de losa (b)
		Luz de ensayo (l_i)
		Longitud voladizo (l_{v_i})
	Otras variables (Apartado 5.3.3)	Presencia de barras y/o fibras acero
		Capa de mortero nivelante
Solicitaciones actuantes (S)	Peso propio (Apartado 5.4.1)	Densidad del hormigón (ρ)
		Espesor de losa equivalente (h_{EQ})
		Anchura de losa equivalente (b_{EQ})
	Cuchillo de carga (Apartado 5.4.2)	Fuerza aplicada pistón (F)
		Anchura de la capa mortero (h_m)

Tabla 5.1. Variables de cálculo utilizadas en el análisis

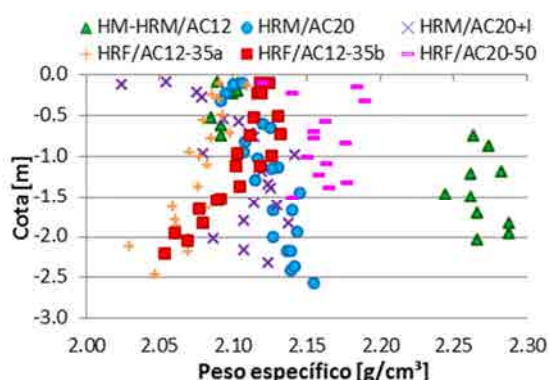
En los Apartados 5.3 y 5.4, van a presentarse las variables del ensayo expuestas en la Tabla 5.1, determinando su magnitud para cada una de las 18 losas ensayadas. Posteriormente (Apartado 5.5), se analizan los resultados del ensayo propiamente dicho.

5.3 RESPUESTA ESTRUCTURAL (R)

5.3.1 Propiedades físico-mecánicas de las losas

Para conocer la respuesta estructural de las losas, se toman los datos de las características de los materiales (expuestos y analizados en el Capítulo 4), obtenidos de los testigos cilíndricos longitudinales (TCZ) extraídos de la otra mitad de cada uno de los bates. Entre estos datos están: el peso específico, el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión (f_{ctm}) y la resistencia residual ($f_{R,i}$). Todos ellos vuelven a presentarse a continuación, en función de la dosificación y la cota en cada batache (eje Z), dada la relevancia de las mismas para el análisis del ensayo de las losas.

Tal y como se observa en la Figura 5.3, las densidades no permanecen constantes, sino que presentan diferencias de hasta un 5 % en función de la cota z del batache. Sin embargo, se considera que dicha variación incide mínimamente sobre el ensayo de las losas, y consecuentemente, para posteriormente determinar la carga de peso propio (Q_{pp}), se adopta como valor de cálculo la densidad media (detallada en la tabla adjunta de la Figura 5.3).

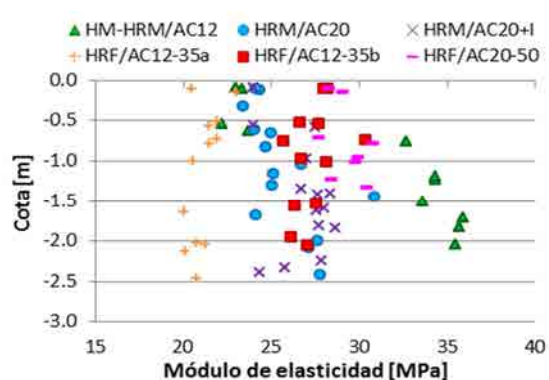


Batache	Dosificación	Densidad (g/cm ³)
#1	HRM/AC20	2,121
#2	HRF/AC12-35b	2,103
#3	HRM/AC12	2,095
	HM/AC12	2,270
#4	HRM/AC20+I	2,104
#5	HRF/AC12-35a	2,076
#6	HRF/AC20-50	2,160

Figura 5.3. $\text{Peso específico} = f(z)$. Valores medios por batache

Como caso excepcional, recordar que el batache #3 se ejecutó con dos dosificaciones: la dosificación patrón (HM/AC12) y la dosificación HRM/AC12, a partes iguales. En base a ello, se toma como valor de densidad de cálculo del batache #3, el promedio de las dos densidades medias: $(2,095 + 2,270) / 2 = 2,183 \text{ g/cm}^3$

La deformación que sufre la losa durante el ensayo de flexión viene determinada por el módulo de elasticidad del hormigón con el que fue fabricado. El criterio adoptado para la elección del valor de cálculo (E_m), detallado en la tabla de la Figura 5.4, es idéntico al empleado con la densidad, tomando el promedio de los resultados obtenidos.



Batache	Dosificación	Módulo E (GPa)
#1	HRM/AC20	25,716
#2	HRF/AC12-35b	27,375
#3	HRM/AC12	23,029
	HM/AC12	34,540
#4	HRM/AC20+I	26,784
#5	HRF/AC12-35a	21,128
#6	HRF/AC20-50	29,288

Figura 5.4. $\text{Módulo de elasticidad} = f(z)$. Valores medios por batache

Las resistencias a tracción expuestas en la Tabla 5.2 se han obtenido a partir de cuatro metodologías distintas (expuestas en la propia tabla), dada la importancia que esta propiedad sobre los resultados del ensayo de las losas, concretamente sobre la carga de fisuración. Para completar la información, junto con los valores de resistencia media (\bar{x}),

se proporciona la desviación estándar (σ) y el número de muestras ensayadas (n), según cada metodología.

Batache	Dosificación	Tipo de probeta testigo										f_{ctm}
		Prismática 150x150x600 ¹			Cúbica 150x150x150 ²			Cilíndrica 90x90 ³			Cilíndrica 180x90 ⁴	
		\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	
#1	HRM/AC20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,08	3,08
#2	HRF/AC12-35b	3,06	0,44	6	3,47	0,42	19	3,31	0,22	11	3,32	3,35
#3	HRM/AC12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,74	2,74
#3	HM/AC12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,08	
#4	HRM/AC20+I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,18	3,18
#5	HRF/AC12-35a	2,47	0,52	5	2,66	0,31	13	2,67	0,30	11	2,85	2,63
#6	HRF/AC20-50	3,35	0,37	6	3,31	0,27	12	3,21	0,21	10	3,45	3,28

El valor de la resistencia a tracción se ha realizado a partir de cuatro metodologías:
¹ Ensayo de testigos prismáticos, según la norma UNE-EN 14651:2007 (solo probetas de HRF).
² Ensayo de testigos cúbicos de 150 mm, según en el ensayo Barcelona sin cadena (solo probetas de HRF).
³ Ensayo de testigos cilíndricos de 90 x 90 mm, según el ensayo Barcelona con cadena (solo probetas de HRF).
⁴ Ensayo de testigos cilíndricos de 180 x 90 mm y aplicando la expresión propuesta por la EHE-08: $f_{ct} = 0,30 \cdot (f_{ck})^{2/3}$

Tabla 5.2. Resistencia a tracción. Valor medio (\bar{x}), desviación estándar (σ) y número de muestras (n) ensayadas por batache. Datos en MPa

Nótese que, mientras la resistencia a tracción de las dosificaciones de HRF ha podido ser evaluada a partir de cuatro metodologías distintas: ensayo de flexotracción, ensayo Barcelona en probeta cúbica de 150 mm, ensayo Barcelona en probeta cilíndrica de 90 x 90 mm, y la expresión empírica propuesta por la EHE-08, la resistencia de las dosificaciones HM y HRM, únicamente ha podido determinarse a partir de esta última.

Las diferencias entre los valores de resistencia medios entre las cuatro metodologías oscilan entre el 10 - 15 %. Las mayores dispersiones se obtienen con el ensayo según la norma UNE-EN 14651:2007, con valores de hasta un 20%, en línea con lo expuesto por Carmona *et al.* (2012), Aire *et al.* (2013) y Pujadas (2013). En vista de las diferencias observadas en los resultados obtenidos para cada ensayo, se adopta como valor de cálculo de la resistencia a tracción (detallada en la columna derecha de la Tabla 5.2), el valor medio obtenido del ensayo de todas las muestras, independientemente de la metodología empleada.

Para las losas del batache #3, compuestas al 50 % por las dosificaciones HM/AC12 y HRM/AC12, se toma como resistencia a tracción el dato correspondiente a la dosificación menos resistente (HRM/AC12). Este criterio se adopta *a posteriori*, en base a los resultados registrados durante el ensayo de flexión de las losas. Concretamente, a partir del diagrama carga - ancho de fisura correspondiente al ensayo de la losa 3C (Figura 5.5a), y que se presenta en la Figura 5.5b. En él se detalla la abertura de fisura registrada en la

superficie lateral de HRM/AC12 (curva continua verde) y la de la superficie lateral de HM/AC12 (curva discontinua roja).

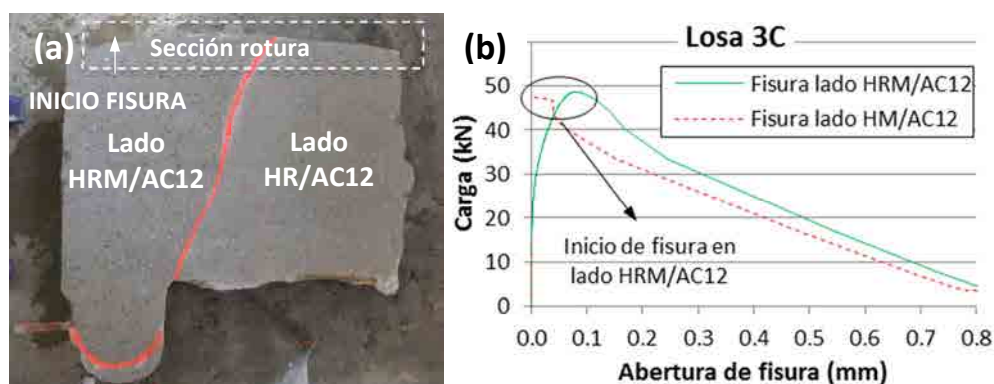


Figura 5.5. Losa 3C. a) Composición de la losa, b) Diagrama P-w

Comparando las dos curvas del gráfico, se demuestra que la abertura de fisura se inicia en el lado de la losa compuesto por el hormigón menos resistente, HRM/AC12, para una carga aplicada de 30 kN. A partir de ese punto, la fisura se propaga hasta que, para una carga de 48,7 kN, alcanza el lado compuesto por el hormigón HM/AC12. Una vez la sección ha fisurado por completo, la losa colapsa.

Por último, en la Tabla 5.3 se presentan las resistencias residuales medias obtenidas para las tres dosificaciones de HRF. El comportamiento post fisuración obtenido es tipo *softening*, ya que la resistencia residual disminuye a medida que aumenta la abertura de fisura. Las resistencias residuales medias se sitúan por debajo de 0,9 N/mm², independientemente del tipo de fibra utilizada. Los dos hechos responden al bajo contenido de fibra aportado (20 kg/m³) en las tres dosificaciones analizadas.

Batache	Dosificación	$f_{R,1}$		$f_{R,2}$		$f_{R,3}$		$f_{R,4}$	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
#2	HRF/AC12-35b	0,61	0,45	0,48	0,44	0,42	0,44	0,39	0,40
#5	HRF/AC12-35a	0,80	0,42	0,61	0,53	0,55	0,47	0,46	0,38
#6	HRF/AC20-50	0,76	0,82	0,64	0,85	0,59	0,84	0,55	0,77

Tabla 5.3. Resistencia residual a flexión. Valor medio (\bar{x}), desv. estándar (σ). Datos en MPa

Otro aspecto a resaltar es la elevada dispersión de resistencias residuales, con valores de desviación estándar (σ) del mismo orden que la resistencia residual media (f_R). Ello se debe a dos motivos; la propia naturaleza del ensayo de flexión UNE-EN 14651:2007, tal y como han descrito con anterioridad otros autores (Parmentier *et al.* 2008; Molins *et al.* 2009), y a las diferentes orientaciones de las fibras en cada testigo ensayado, en función de su localización en el batache, tal y como se mostró en la Tabla 4.16, Tabla 4.17 y Figura 4.19.

5.3.2 Geometría de las losas

Tras la llegada de las 18 losas al LTE Luis Agulló de la UPC, se procedió a determinar la geometría de las mismas. Esta tarea resulta necesaria para posteriormente analizar los resultados obtenidos, dado que la respuesta estructural de los elementos a ensayar depende de la inercia seccional (I_x), que a su vez, depende de variables como el canto (h) y anchura (b) de la losa. Otro motivo para realizar el replanteo es establecer, en base a la geometría de las losas, la distancia entre apoyos, o luz de ensayo, para cada una de ellas.

Replanteo de las losas. Espesor (h) y ancho (b)

En la Tabla 5.4, se presentan los espesores y anchos de las 18 losas. En ambos casos los registros se efectuaron en intervalos de 15 cm. A partir de los datos mostrados, pueden identificarse dos tipos de losas en función de su espesor (h). Por un lado, las seis losas centrales, denominadas "C", cuyo canto permanece constante e igual a 20 cm y las doce restantes ("S" e "I"), de canto variable, con valores comprendidos entre los 8,0 y los 32,6 cm.

Losa	h = f (z)													
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
1C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
1S	32,6	31,6	29,2	30,8	29,3	29,9	28,6	28,0	27,6	25,9	20,8	17,2	13,5	15,0
1I	11,0	11,2	11,2	12,0	12,8	19,2	15,0	14,0	15,0	14,5	14,3	15,2	14,5	16,7
2C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
2S	16,2	16,8	15,8	15,9	18,4	19,1	18,6	18,3	18,3	17,5	17,8	18,8	18,8	17,3
2I	21,3	21,5	21,3	23,6	24,1	26,3	25,6	25,0	25,5	25,5	25,4	24,6	24,1	24,2
3C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
3S	20,4	19,8	19,7	19,5	19,5	18,5	17,8	18,5	17,8	17,4	16,5	-	16,2	15,2
3I	19,4	22,8	23,2	23,4	23,9	23,2	24,3	24,1	23,5	24,5	24,1	24,2	23,1	19,9
4C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
4S	25,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4I	19,0	19,0	21,5	22,0	22,0	22,0	22,0	21,5	21,0	20,0	20,0	-	21,5	22,0
5C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
5S	14,4	13,6	15,1	14,7	14,2	14,4	14,8	15,4	17,0	16,4	16,5	15,7	14,6	12,5
5I	30,4	32,2	32,2	31,8	32,3	32,4	30,0	28,6	27,9	27,9	29,3	29,9	29,7	28,3
6C	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
6S	18,7	18,3	18,0	18,2	17,3	16,6	15,4	16,2	13,5	12,7	11,7	10,7	8,0	-
6I	25,5	25,7	27,3	27,3	27,0	27,9	29,7	30,0	29,8	30,9	30,9	31,9	29,8	29,7

Tabla 5.4a. Replanteo de las losas. Canto $h = f(z)$. Datos en cm

Losa	b = f (z)													
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
1C	177	178	175	174	173	174	169	170	169	167	163	160	155	150
1S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1I	178	178	174	173	173	170	168	167	168	164	161	153	153	150
2C	165	160	158	163	167	169	168	171	172	173	174	150	132	109
2S	162	160	161	-	166	162	165	180	168	171	171	149	137	114
2I	165	164	168	167	168	163	171	173	172	172	156	138	120	102
3C	181	181	181	184	181	177	182	180	177	177	175	176	175	172
3S	181	179	-	180	180	173	176	176	176	175	175	-	174	172
3I	182	183	183	176	-	181	178	179	178	177	181	-	-	174
4C	165	165	171	171	172	170	171	173	173	176	179	181	176	160
4S	166	165	-	171	169	180	173	174	177	177	179	154	152	140
4I	150	-	166	167	168	170	171	167	171	176	180	-	169	166
5C	164	164	171	172	173	169	167	163	161	160	160	160	157	153
5S	162	165	172	172	170	163	163	161	160	159	159	159	152	147
5I	164	166	172	173	172	175	176	174	173	162	161	159	159	156
6C	171	168	167	175	174	172	167	168	169	-	172	173	163	112
6S	166	165	165	169	169	169	165	167	169	171	-	169	149	-
6I	168	168	168	174	175	174	170	170	171	173	-	173	163	140

Tabla 5.4b. Replanteo de las losas. Ancho $b = f(z)$. Datos en cm

En cambio, la anchura de las losas se mantiene más estable (excepto las losas 2S, 2C, y 2I), con valores comprendidos entre los 160 y los 180 cm, lo que supone una variación del 12 %. Por el contrario, en las losas 2S, 2C y 2I, se produce una disminución brusca de la anchura a partir de la cota z superior a 150 cm (datos resaltados en rojo en la Tabla 5.4b), como consecuencia de la rotura de una esquina del batache #2, tal y como se muestra en la Figura 5.6a.

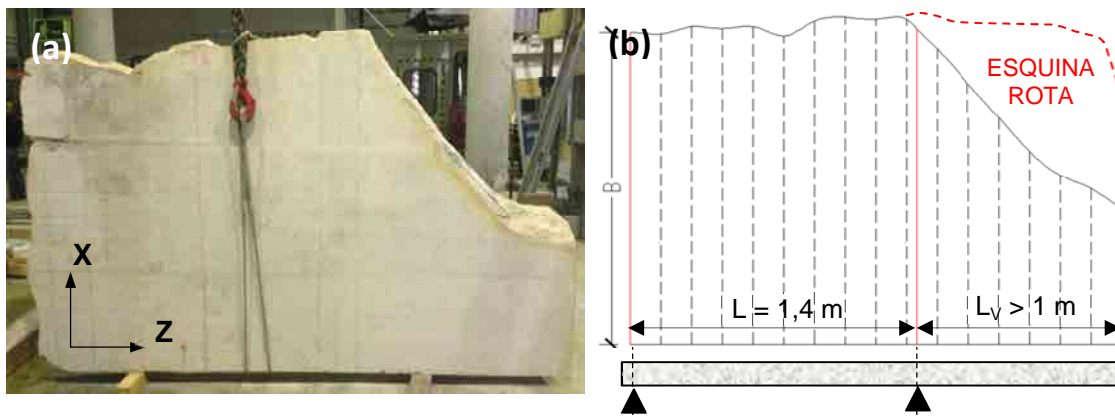


Figura 5.6. Losa 2C. Rotura de la esquina. Voladizo lateral

La rotura del batache se produjo durante el transporte realizado desde la obra hasta las instalaciones que la empresa *Gestora de Runes del Llobregat* tiene en el Puerto de Barcelona. Tal como se esquematiza en la Figura 5.6b, esta incidencia, además de reducir la luz de ensayo en las losas 2C, 2S y 2I, hasta 1,40 m, genera un voladizo lateral de longitud no despreciable ($L_v > 1,0$ m), que debe considerarse en los cálculos a realizar.

Influencia del proceso de corte sobre la geometría de las losas

El hecho que las seis losas “C” sean de canto constante, confirma que los dos cortes necesarios para obtener las losas (descritos en la Figura 5.1), se realizaron paralelos entre sí. Sin embargo, las diferencias entre espesores observadas en las losas “S” e “I” se deben a dos motivos: por un lado, la rugosidad del contacto terreno-estructura, que depende de la calidad de la excavación de la zanja, y por otro, al proceso de corte del batache. En la Figura 5.7 se representan las diferentes repercusiones que ocasiona el proceso de corte sobre la geometría de las losas.

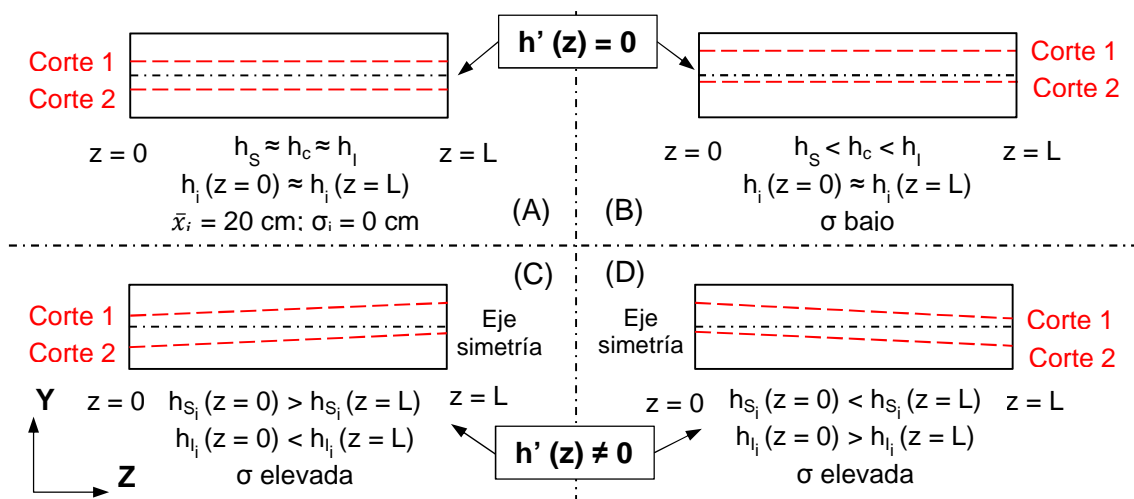


Figura 5.7. Influencia del proceso de corte sobre el espesor de la losa (Vista perfil)

El caso “A” se corresponde con la situación óptima; los dos cortes con hilo de diamante se realizan de forma paralela y centrada respecto al eje de simetría de la pieza, obteniendo tres losas de canto constante e igual a 20 cm. En el caso “B”, los cortes se realizan de forma paralela pero no centrada respecto al eje de simetría. Con esta situación, las losas obtenidas tienen un grosor constante en sentido longitudinal pero de diferente magnitud entre sí. Por último, los casos “C” y “D”, los cortes aplicados se realizan de forma oblicua respecto al eje de simetría, por lo que se obtienen losas de canto variable.

Relacionando los espesores de las losas (dados de la Tabla 5.4a), con los procesos de corte representados en la Figura 5.7 se confirma que el corte de los bataches #1 y #6 no fue el adecuado, obteniendo losas de geometría irregular, con importantes variaciones del espesor, tanto en dirección longitudinal ($h'(z) \neq 0$), como transversal ($h'(x) \neq 0$), siguiendo el patrón mostrado en los casos “C” y “D”. En las losas obtenidas de sendos

procesos de corte (losas 1S, 1I, 6S y 6I), los espesores máximo y mínimo se obtienen en las secciones extremas $z = 0$ cm y $z = 195$ cm, además de obtener desviaciones estándar (σ) elevadas, comprendidas entre 2,0 y 6,4 cm.

En cambio, el corte del batache #5 responde al caso "B", obteniendo tres losas con espesores medios dispares: 15,0; 20,0 y 30,2 cm, y bajas desviaciones estándar. Por último, en los bataches #2, #3 y #4 el proceso de corte se realizó de forma correcta, dado que el canto de las losas obtenidas a partir de estos, se sitúa entre los 17,7 y 24,1 cm, con dispersiones inferiores a los 2 cm.

	Batache #1			Batache #2			Batache #3		
	1S	1C	1I	2S	2C	2I	3S	3C	3I
\bar{h}	25,7	20,0	14,0	17,7	20,0	24,1	18,2	20,0	23,1
σ	6,4	0,0	2,3	1,1	0,0	1,7	1,6	0,0	1,6
Proceso	CASO C			CASO A			CASO A		

	Batache #4			Batache #5			Batache #6		
	4S	4C	4I	5S	5C	5I	6S	6C	6I
\bar{h}	-	20,0	21,0	15,0	20,0	30,2	15,0	20,0	28,8
σ	-	0,0	1,1	1,2	0,0	1,7	3,4	0,0	2,0
Proceso	CASO A			CASO B			CASO D		

Tabla 5.5. Valor medio (\bar{h}) y dispersión (σ) del espesor de las losas. Datos en cm

Luces de ensayo

Una vez obtenida y analizada la geometría, puede establecerse la luz de ensayo para cada una de las losas a ensayar. Para ello, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Las tres losas procedentes de un mismo batache ("S", "C" e "I"), deben tener una luz de ensayo idéntica.
- Tomando como referencia el batache originalmente ejecutado, el cuchillo de carga actuante sobre la sección centro luz de las tres losas extraídas de éste, debe aplicarse sobre una misma sección, a fin de poder relacionar los resultados obtenidos.
- La anchura de la losa entre las dos secciones de apoyo debe ser, como mínimo, igual a la longitud de los caballetes utilizados para ello, es decir, 1,50 metros.
- El espesor de la losa en las secciones de apoyo debe ser superior a 10 cm, a fin de evitar posibles roturas debidas al esfuerzo cortante.

Con los criterios enunciados, y en base a los resultados del replanteo detallados anteriormente en la Tabla 5.4, se establecen las siguientes luces de ensayo:

- Losas 1C, 1S, 1I, 3C, 3S, 3I, 4C, 4S, 4I, 5C, 5S, 5I: **1,90 metros**
- Losas 6C, 6S, 6I: **1,60 metros**
- Losas 2C, 2S, 2I: **1,40 metros**

Aunque la relación de la luz entre apoyos y ancho de la losa (l/b) se sitúa entre 0,8 y 1,25, la configuración de carga permite tratar el elemento ensayado como una viga biapoyada, suponiendo como válida la teoría de vigas (Hipótesis de Euler-Bernoulli).

Geometría homogeneizada

Dado que la geometría de las losas es variable sección a sección, para posteriormente determinar la magnitud de la carga debida al peso propio de la losa (Q_{PP}), se considera necesario adoptar una estrategia que facilite, pero mantenga en todo momento la consistencia en los cálculos. En este sentido, se ha optado por **homogeneizar la geometría**, tal y como esquematiza la Figura 5.8, trabajando con espesores (h_{EQ}) y anchos equivalentes (b_{EQ}), definidos a partir de los registros tomados durante el replanteo, según se detalla en las expresiones [5.2] y [5.3].

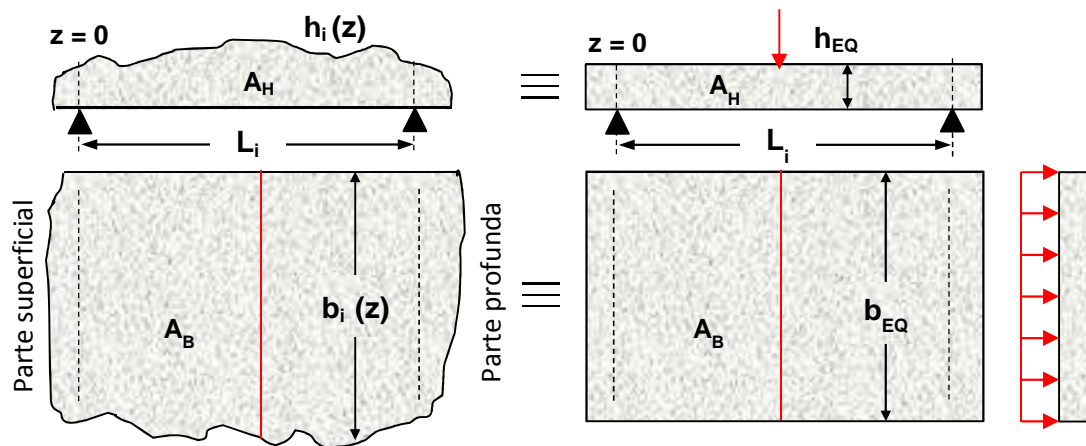


Figura 5.8. Ejemplo de homogeneización geométrica de las losas

$$h_{EQi} = \frac{\int_0^{l_i} h_{ij} \cdot dz_j}{l} \sim \frac{\sum_0^{l_i} \frac{(h_j + h_{j+1})}{2} \cdot dz_j}{l_i} = \frac{A_H}{l} \quad [5.2]$$

$$b_{EQi} = \frac{\int_0^{l_i} b_j \cdot dz_j}{l_i} \sim \frac{\sum_0^{l_i} \frac{(b_j + b_{j+1})}{2} \cdot dz_j}{l_i} = \frac{A_B}{l_i} \quad [5.3]$$

- con: h_{EQi} : espesor equivalente de la losa "i", en metros
 h_j : espesor de la sección "j", perteneciente a la losa "i", en metros
 h_{j+1} : espesor de la sección "j+1", perteneciente a la losa "i", en metros
 b_{EQi} : anchura equivalente de la losa "i", en metros

- b_j : anchura registrada en la sección "j", perteneciente a la losa "i", en metros
 b_{j+1} : anchura registrado en la sección "j+1", perteneciente a la losa "i", en metros
 dz_j : distancia entre secciones. Igual a 0,15 metros
 l_i : luz de ensayo de la losa "i", en metros
 A_H : área de la sección lateral de la losa, en metros²
 A_B : área de la sección en planta de la losa, en metros²

En la Tabla 5.6 se detallan los espesores y anchos equivalentes obtenidos de cada losa. Las anchuras equivalentes (b_{EQ}) de las losas oscilan entre los 1,63 y los 1,79 m, lo que supone una diferencia del 10 % entre los valores extremos. Hay que recordar, que la anchura original de los seis batches era de 3,5 metros:

	Batache #1			Batache #2			Batache #3		
	1S	1C	1I	2S	2C	2I	3S	3C	3I
A_H (m ²)	0,497	0,380	0,266	0,246	0,280	0,337	0,346	0,380	0,447
A_B (m ²)	-	3,211	3,174	2,324	2,331	2,357	3,355	3,398	3,355
h_{EQ} (m)	0,262	0,200	0,140	0,176	0,200	0,241	0,182	0,200	0,235
b_{EQ} (m)	1,70	1,69	1,67	1,63	1,67	1,68	1,77	1,79	1,77

	Batache #4			Batache #5			Batache #6		
	4S	4C	4I	5S	5C	5I	6S	6C	6I
A_H (m ²)	-	0,380	0,400	0,288	0,380	0,577	0,254	0,320	0,457
A_B (m ²)	3,219	3,281	3,240	3,092	3,279	3,196	2,686	2,725	2,744
h_{EQ} (m)	0,190	0,200	0,210	0,151	0,200	0,303	0,159	0,200	0,286
b_{EQ} (m)	1,69	1,73	1,71	1,63	1,73	1,68	1,68	1,70	1,71

Tabla 5.6. Cálculo de espesores y anchos equivalentes

En cambio, las diferencias obtenidas en relación al espesor equivalente (h_{EQ}) son mayores, debido a que los dos cortes realizados con hilo diamantado se realizaron de forma oblicua respecto el eje de la losa. Ello conduce a valores de h_{EQ} comprendidos entre los 0,14 y los 0,30 metros.

5.3.3 Otras variables

Presencia de fibras y/o barras de acero

Otra variable que altera la respuesta estructural de las losas, es la presencia de fibras y/o barras de acero. A diferencia de las variables estudiadas anteriormente (propiedades físicas y mecánicas, geometría de las losas, etc.), el refuerzo existente incide únicamente sobre el comportamiento post-fisuración.

La incidencia ejercida por cada uno de los dos tipos de refuerzo resulta muy desigual, dependiendo de la finalidad para la que fue colocado en los bataches. Por un lado, el objetivo de las fibras de acero es garantizar una resistencia residual suficientemente elevada para evitar la rotura frágil del hormigón. Por lo tanto, éstas se distribuyen de forma homogénea en todo el elemento (tal y como se ha mostrado en el capítulo 4). Sin embargo, la disposición de las barras de acero Ø16, y por ende, su influencia sobre los resultados, no sigue un patrón común. Su colocación se debe a razones constructivas, con el fin de facilitar el izado y retirada de los bataches, una vez la excavación alcanza la profundidad necesaria.

Durante las tareas de replanteo, se determinó la presencia o no barras de acero en cada una de las 18 losas a ensayar, y en caso afirmativo, su trayectoria. Dado que el objetivo de los ensayos era analizar el comportamiento del elemento estructural, provisto de las fibras de acero como único refuerzo, se adoptaron las medidas necesarias, a fin de que el impacto sobre los resultados de las barras de acero fuera mínimo. En la Tabla 5.7 se detalla el refuerzo (fibras y/o barras) existente las losas, así como su influencia sobre los resultados obtenidos del ensayo.

Refuerzo		Batache #1			Batache #2			Batache #3		
		1S	1C	1I	2S	2C	2I	3S	3C	3I
Fibras de acero	C_f (kg/m ³)	0	0	0	20	20	20	0	0	0
	Tipo fibra	-	-	-	M503	M503	M503	-	-	-
Barras de acero Ø16	Presencia	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
	Influencia	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI

Refuerzo		Batache #4			Batache #5			Batache #6		
		4S	4C	4I	5S	5C	5I	6S	6C	6I
Fibras de acero	C_f (kg/m ³)	0	0	0	20	20	20	20	20	20
	Tipo fibra	-	-	-	M503	M503	M503	M502	M502	M502
Barras de acero Ø16	Presencia	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI
	Influencia	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI

Tabla 5.7. Refuerzo existente en cada losa. Fibras y/o barra de acero

En trece de las dieciocho losas hay barras de acero. Sin embargo, únicamente en cinco de ellas (losa 2C, 2I, 3I, 6S y 6I), las barras pueden alterar el comportamiento post-fisuración de forma significativa. En los ocho casos restantes (1S, 1C, 3S, 3C, 4S, 4C, 4I y 6C), la barra de acero no condiciona los resultados obtenidos dado que ésta no atraviesa la sección transversal de fisuración (o bien la atraviesa cerca de la fibra superior).

A modo de ejemplo, en la Figura 5.9 se particulariza el distinto grado de influencia de las barras de acero en el ensayo de las losas 3C, 3S y 3I. En el batache #3 se introdujeron dos barras de acero Ø16, que lo atravesaban completamente. Dado que la

trayectoria de una de las barras no era totalmente vertical, uno de los dos cortes aplicados con hilo de diamante la seccionó, quedando un trozo en la losa 3S y el otro en la losa 3I. En cambio, la segunda barra quedó íntegra en la losa 3I.

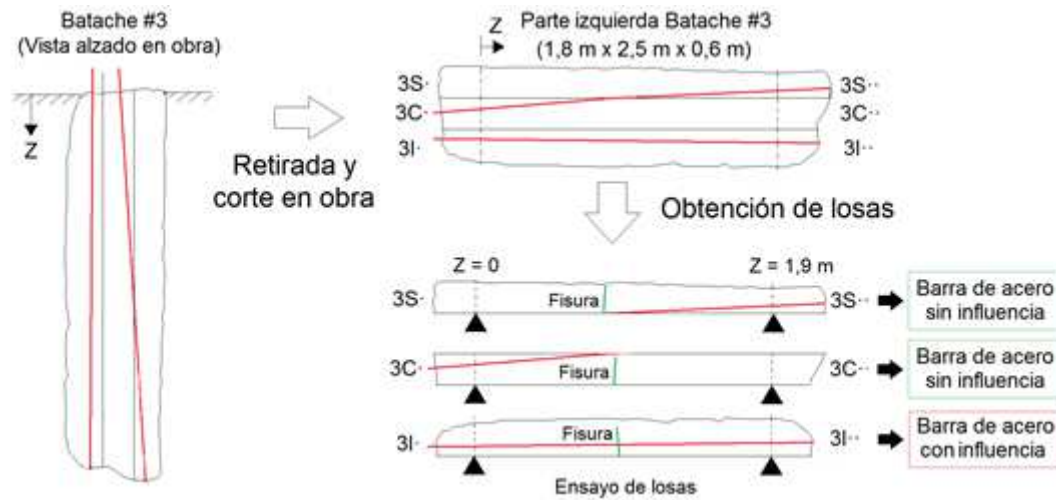


Figura 5.9. Grado de influencia de las barras $\varnothing 16$, en función de su trayectoria (Batache #3)

La influencia de las barras sobre el ensayo de las tres losas es muy diferente. En la losa 3S, la fisuración se produce justo en la sección donde la barra intersecta la fibra inferior, por lo su influencia es nula (Figura 5.10a). En la losa 3C, la fisuración se genera en una sección donde la barra está localizada cerca de la fibra superior, por lo que su influencia sobre la capacidad resistente es mínima. Por el contrario, en la losa 3I, la barra discurre de forma paralela, y a 5 cm del plano de corte (Figura 5.10b), por lo que incide notablemente sobre el comportamiento resistente post-fisuración. En la Figura 5.10c, se muestra la gráfica carga - abertura de fisura, obtenida del ensayo de las losas 3C y 3I.

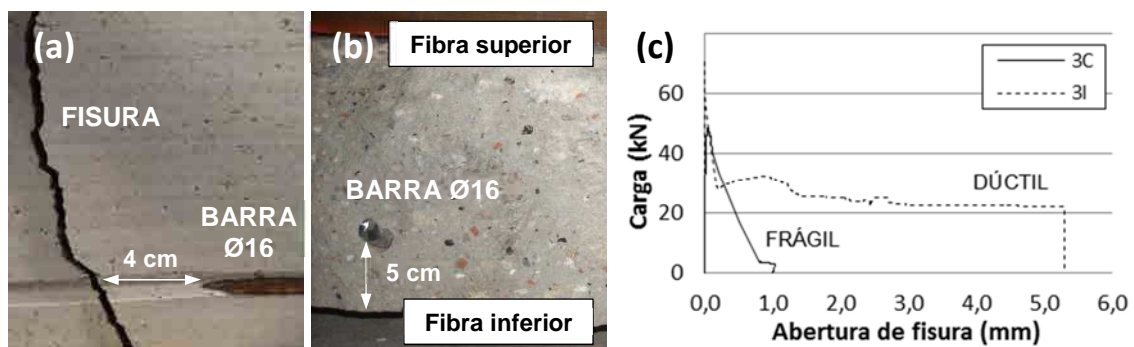


Figura 5.10. Influencia de las barras de acero sobre los resultados obtenidos

Pendiente transversal

La obtención de las lasas requería de dos cortes con hilo diamantado sobre el batache. El hecho de que dichos cortes se realizaron de forma oblicua a la superficie del batache incide sobre la geometría de las lasas "S" e "I", tanto en sentido longitudinal (tal y

como se mostró en la Tabla 5.4a), como sobre su sección transversal, tal y como se esquematiza la Figura 5.11.

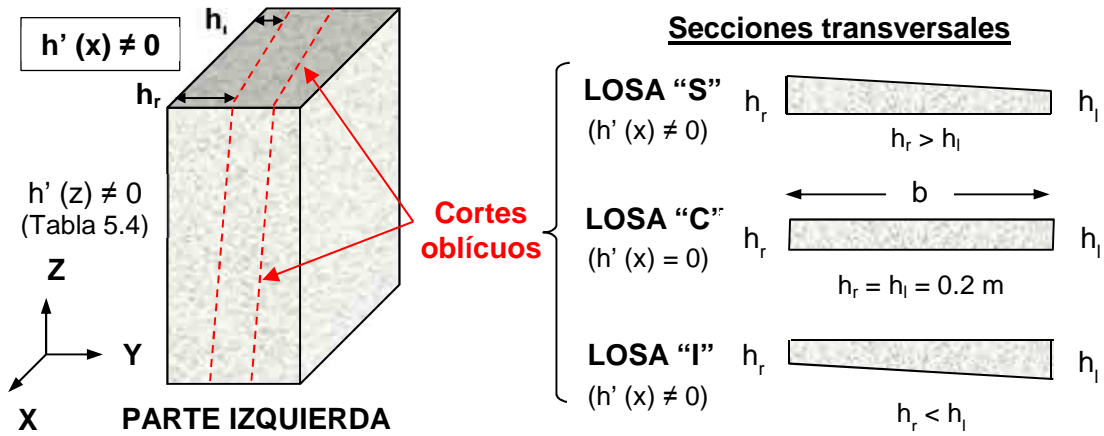


Figura 5.11. Consecuencias geométricas de los cortes oblicuos

Los dos cortes, paralelos entre sí, no afectan a la sección transversal de las losas “C”, cuyo grosor se mantiene constante e igual a 20 cm ($h'(x) = 0$). Sin embargo, las losas “S” e “I” presentan importantes diferencias entre el canto correspondiente a la superficie lateral lisa (h_l), cuyos datos se mostraron en la Tabla 5.4a, y el de la superficie lateral rugosa (h_r).

Para que la carga del pistón se distribuya uniformemente en todo el ancho de la losa, ésta debe aplicarse sobre una superficie regular y horizontal. En este sentido, la pendiente transversal de las losas tipo “S” e “I” ($i = |h_l - h_r|/b$) se corrige gracias al mortero de nivelación aplicado en todo el ancho de la sección centro luz (Figura 5.12). Su espesor (h_m), viene condicionado por el espesor de la losa en las dos caras laterales, h_l y h_r , de forma tal que el espesor del conjunto losa-mortero, en ambos lados sea idéntica, tal y como detalla la expresión [5.4].

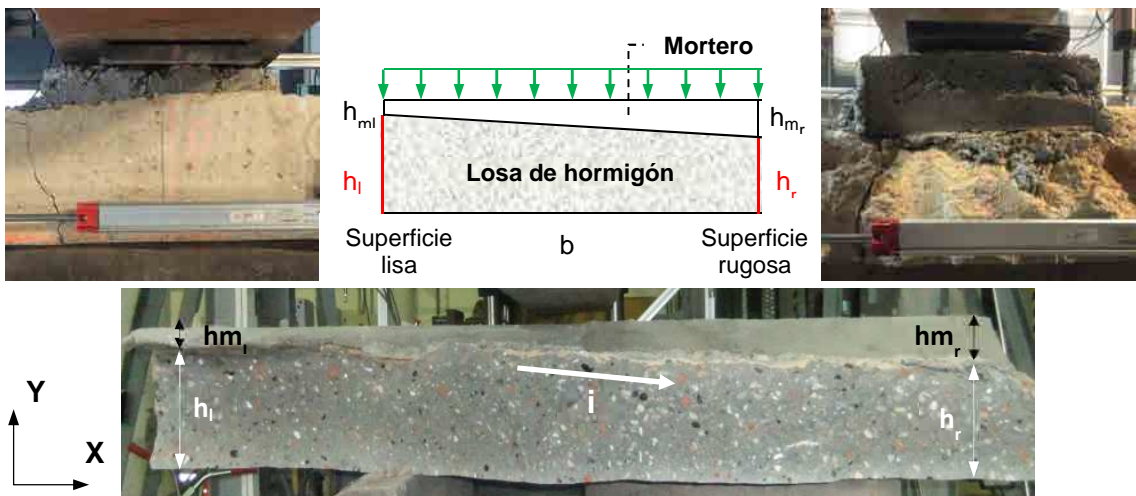


Figura 5.12. Pendiente transversal de la losa 4S. Mortero de nivelación

$$h_l + hm_l = h_r + hm_r \quad [5.4]$$

- con: h_l : grosor de la losa en la superficie lisa, en metros.
 hm_l : grosor de mortero en la superficie lisa, en metros.
 h_r : grosor de la losa en la superficie rugosa, en metros.
 hm_r : grosor de mortero en la superficie rugosa, en metros.

El mortero de nivelación se aplicó sobre la losa 24 horas antes de la realización del ensayo, sin aplicarse ninguna sustancia adherente sobre la superficie de contacto losa-mortero. Por tanto, se considera que los dos elementos trabajan independientemente, y consecuentemente, la respuesta estructural de la losa viene determinada únicamente por la sección transversal de la losa, concretamente de su inercia (I_x).

La expresiones [5.5] y [5.6] proporcionan la inercia transversal de las losas, diferenciando entre losas tipo "S" o "I" (de sección trapezoidal) y losas tipo "C" (de sección rectangular), a partir de su geometría. Nótese, que la expresión [5.6], es una forma particular de la expresión [5.5], suponiendo que el espesor de losa es idéntico en ambos lados ($h_l = h_r = h$) y que el centro de gravedad de la sección se encuentra en $y = h/2$.

$$I_x = \frac{b_e h_2^3}{12} + b_e h_2 \cdot \left(y_{CDG} - \frac{h_2}{2} \right)^2 + \frac{b_e (h_1 - h_2)^3}{12} + \frac{b_e (h_1 - h_2)}{2} \cdot (h_2 - y_{CDG})^2 \quad [5.5]$$

$$I_x = \frac{b_e h^3}{12} \quad [5.6]$$

- donde: I_x : inercia de la sección, en dirección X, en metros⁴.
 b_e : anchura eficaz de la losa en la sección de rotura, en metros.
 h_1 : espesor máximo de la losa en la sección de rotura, en metros = $\max \{h_l, h_r\}$
 h_2 : espesor mínimo de la losa en la sección de rotura, en metros = $\min \{h_l, h_r\}$
 y_{CDG} : distancia de la fibra inferior al centro de gravedad de la sección, en metros.

En la Tabla 5.8 se muestran las inercias de las secciones de rotura de las 18 losas. Estos resultados han sido obtenidos tras sustituir los valores de h_1 , h_2 , b_e y y_{CDG} (incluidos en dicha tabla), en la expresiones [5.5] o [5.6], según corresponda a losas tipo "S"- "I" o tipo "C", respectivamente.

Los valores geométricos utilizados en el cálculo de la inercia se han obtenido de dos formas distintas. Los valores del espesor de la superficie lisa (h_l) y anchura de la losa (b), se han obtenido interpolando los valores dado en la Tabla 5.4a y Tabla 5.4b, respectivamente para la sección crítica $z = z_{CR}$. En cambio, los valores del espesor de la losa en la superficie rugosa (h_r), así como los espesores del mortero nivelante, en $z = z_{CR}$, se han obtenido a partir del registro fotográfico y anotaciones realizadas tras el ensayo.

Losa	z_{CR} (m)	b_e (m)	h_l (m)	hm_l (m)	h_r (m)	hm_r (m)	y_{CDG} (m)	I_x (m ⁴)
1S	0,95	1,70	0,28	0,04	0,31	0,01	0,147	0,003588
1C	0,95	1,69	0,20	-	0,20	-	0,100	0,001127
1I	0,95	1,68	0,14	0,02	0,06	0,10	0,053	0,000159
2S	0,70	1,70	0,18	0,03	0,15	0,06	0,083	0,000613
2C	0,70	1,69	0,20	-	0,20	-	0,100	0,001127
2I	0,70	1,72	0,25	0,01	0,17	0,10	0,106	0,001188
3S	0,95	1,76	0,18	0,09	0,27	0,00	0,114	0,001490
3C	0,95	1,81	0,20	-	0,20	-	0,100	0,001207
3I	0,95	1,78	0,24	0,01	0,14	0,11	0,097	0,000902
4S	1,01	1,74	0,22	0,03	0,16	0,09	0,096	0,000910
4C	0,98	1,72	0,20	-	0,20	-	0,100	0,001147
4I	0,77	1,70	0,22	0,07	0,26	0,03	0,120	0,001895
5S	0,95	1,67	0,15	0,07	0,19	0,03	0,085	0,000645
5C	0,91	1,45	0,20	-	0,20	-	0,100	0,000967
5I	0,58	1,17	0,32	0,07	0,28	0,11	0,150	0,002575
6S	1,07	1,67	0,16	0,07	0,21	0,02	0,093	0,000820
6C	0,80	1,70	0,20	-	0,20	-	0,100	0,001133
6I	0,79	1,73	0,28	0,05	0,24	0,09	0,013	0,002462

Tabla 5.8. Inercia seccional (I_x) de las losas analizadas

La dependencia cúbica (potencial de tercer grado) del espesor de la losa sobre el valor de la inercia seccional, provoca que las diferencias relativas al canto de las losas se acentúen, y repercutan sobre los resultados obtenidos, con diferencias de hasta un orden de magnitud entre el valor inercial máximo, correspondiente a la losa 1S, y el valor mínimo (losa 1I).

Nótese que las anchuras eficaces (b_e) utilizadas para el cálculo de la inercia seccional de las losas 5S, 5C y 5I, son menores que la anchura real de dichas losas (b_i), que se sitúa entre 1,62 y 1,72 metros. Ello se debe a la existencia de una pre-fisura detectada durante las tareas de replanteo. Dicha fisura une la superficie lateral de la losa con una coquera situada a 50 - 60 cm de esta.

Dependiendo de la trayectoria seguida por la fisura generada durante el ensayo, esta incidencia reduce el ancho eficaz de la sección entre un 13 y un 32 %, según el caso. En la Figura 5.13a se muestra la losa 5I durante el proceso de volteo previo a su ensayo, donde pueden apreciarse la pre-fisura y la coquera existente. Además de reducir la anchura eficaz de las losas 5C, 5S y 5I, la pre-fisura altera el comportamiento estructural

durante el ensayo, condicionando la trayectoria de la fisuración, tal y como se observa en la Figura 5.13b

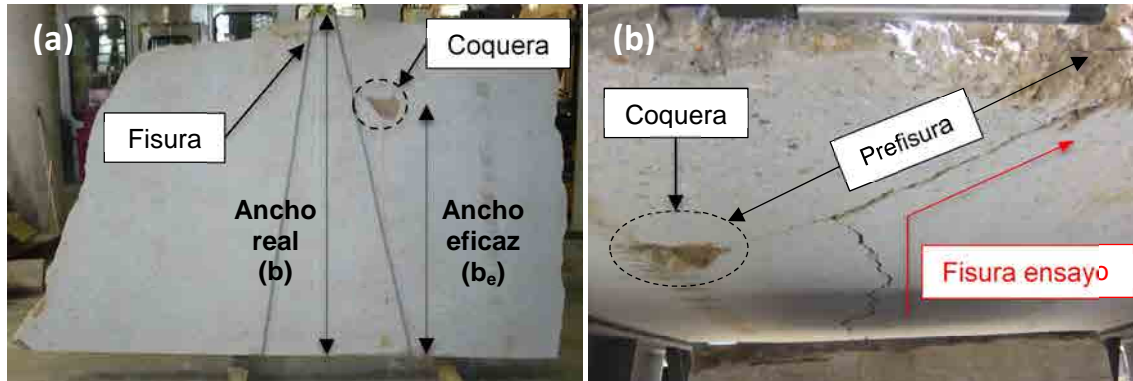


Figura 5.13. Presencia de secciones débiles en las losas del batche #5 (fisura y coquera)

5.4 SOLICITACIONES ACTUANTES

Durante el ensayo actúan dos tipos de solicitaciones. Por un lado, la carga constante y uniformemente repartida debido al peso propio de la losa (Q_{PP}), esquematizada en la Figura 5.14a, y por otro, el cuchillo de carga (F) aplicado en la sección centro luz, variable (Figura 5.14b).

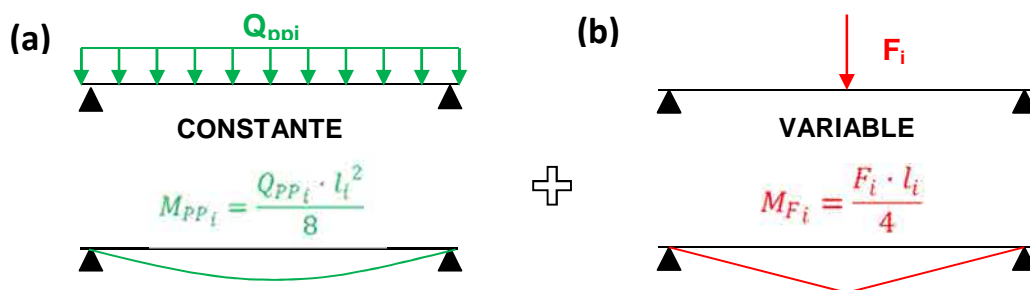


Figura 5.14. Cargas actuantes durante el ensayo. Diagramas de Momento flector

Tal y como se observa en las leyes de esfuerzo de ambas solicitaciones, los mayores esfuerzos se alcanzan en la sección centro luz. Sin embargo, la geometría irregular de las losas, la heterogeneidad de las propiedades mecánicas, la capa de mortero de nivelación o la presencia de barras de acero, pueden provocar que la fisuración se inicie en una sección distinta a la teóricamente esperable (centro luz), que denominamos sección crítica.

Elección de la sección crítica ($z = z_{CR}$)

El cálculo seccional (definido por la expresión [5.1]) debe realizarse sobre la **sección crítica**, $z = z_{CR}$. Dada la trayectoria irregular de la(s) fisura(s) generadas, la

sección crítica se ha determinado en función del mapeo de fisuras y del registro fotográfico realizado de forma posterior al ensayo, adoptando el siguiente criterio:

- En caso que la trayectoria de la fisura cruce la sección centro luz, se adopta ésta como sección crítica [$z_{CR} = \alpha \cdot l = 0,5 \cdot l$] (Figura 5.15a)
- Si la trayectoria de la fisura no cruza la sección centro luz, se adopta como sección crítica la situada más próxima a la sección centro luz [$z_{CR} = \alpha \cdot l$] (Figura 5.15b)

A modo de ejemplo, en la Figura 5.15 se ejemplifica la elección de la sección crítica en función de la trayectoria de la fisura, presentándose los dos casos posibles.

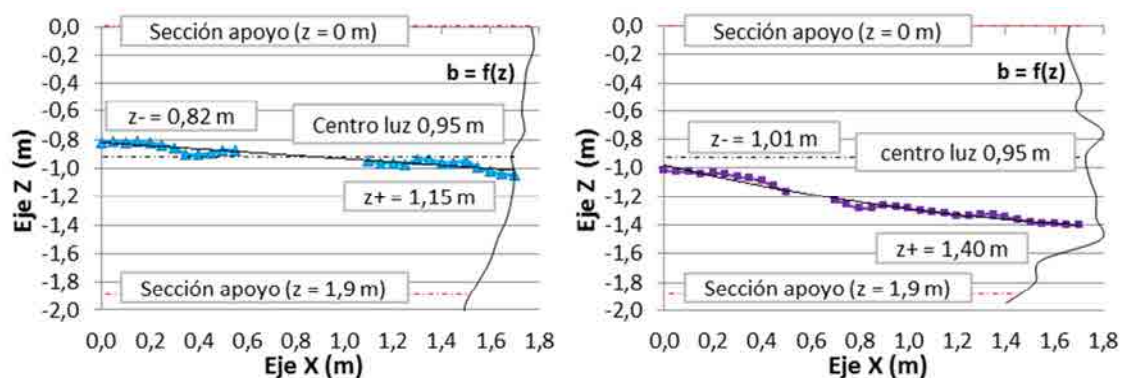


Figura 5.15. Elección de la sección crítica, en función de la fisura. a) Losa 1C, b) Losa 4S

Mientras que en la losa 1C (Figura 5.15a), la fisura cruza la sección centro luz ($z = 0,95$ m), adoptándose ésta como sección crítica; en la losa 4S (Figura 5.15b), la fisura no cruza la sección centro luz, y se toma como sección crítica, la sección fisurada más próxima a ésta ($z = 1,01$ m). El mapeo de fisuras, en base al cual se han seleccionado las secciones críticas dadas en la Tabla 5.9, viene adjunto en el ANEJO C.

	Batache #1 ($l = 1,9$ m)			Batache #2 ($l = 1,4$ m)			Batache #3 ($l = 1,9$ m)		
	1S	1C	1I	2S	2C	2I	3S	3C	3I
Z^- (m)	0,94	0,82	0,82	0,47	0,69	0,47	0,65	0,93	0,81
Z^+ (m)	1,09	1,05	1,17	0,71	0,86	0,78	1,08	1,02	1,29
Z_{CR} (m)	0,95	0,95	0,95	0,70	0,70	0,70	0,95	0,95	0,95
α [-]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

	Batache #4 ($l = 1,9$ m)			Batache #5 ($l = 1,9$ m)			Batache #6 ($l = 1,6$ m)		
	4S	4C	4I	5S	5C	5I	6S	6C	6I
Z^- (m)	1,01	0,98	0,73	0,73	0,80	0,45	1,07	0,71	0,49
Z^+ (m)	1,40	1,15	0,77	1,09	0,91	0,58	1,18	0,92	0,79
Z_{CR} (m)	1,01	0,98	0,77	0,95	0,91	0,58	1,07	0,80	0,79
α [-]	0,53	0,52	0,41	0,50	0,48	0,31	0,67	0,50	0,49

Tabla 5.9. Secciones críticas

En once de las dieciocho losas, se produce la situación lógica, ya que la fisura se produce en la sección centro luz ($\alpha = 0,50$). Sin embargo, en las losas 4I, 5I y 6S, la fisuración se inicia en un sección sensiblemente alejada del centro luz, tal y como reflejan los valores del parámetro adimensional α igual a 0,41, 0,31 y 0,67, respectivamente. En estos tres casos, la fisura se genera por los aspectos descritos a continuación:

- Losa 4I ($\alpha=0,41$): Trayectoria de la barra de acero.
- Losa 5I ($\alpha=0,31$): Pre-fisura y coquera
- Losa 6I ($\alpha=0,67$): Sección débil y elevado espesor mortero nivelante

5.4.1 Carga de peso propio

En la Tabla 5.10 se presentan las cargas uniformemente distribuidas debidas al peso propio (Q_{PP}), actuantes sobre cada una de las losas, y obtenidas a partir de la expresión [5.7]. Dicha tabla se completa detallando los valores de h_{EQ} y b_{EQ} , calculados previamente a partir de las expresiones [5.2] y [5.3], así como el dato de densidad media del hormigón correspondiente a los testigos extraídos (ver Figura 5.3).

$$Q_{PPi} = \prod_i \rho_{mi} \cdot h_{EQi} \cdot b_{EQi} \quad [5.7]$$

- con: Q_{PPi} : carga equivalente de peso propio de la losa "i"
 ρ_{mi} : densidad media del hormigón de la losa "i"
 h_{EQi} : espesor equivalente de la losa "i", obtenido según la expresión [5.2]
 b_{EQi} : anchura equivalente de la losa "i", obtenido según la expresión [5.3]

	Batache #1			Batache #2			Batache #3		
	1S	1C	1I	2S	2C	2I	3S	3C	3I
ρ_m (g/cm ³)	2,121	2,121	2,121	2,103	2,103	2,103	2,183	2,183	2,183
h_{EQ} (m)	0,262	0,200	0,140	0,176	0,200	0,241	0,182	0,200	0,235
b_{EQ} (m)	1,70	1,69	1,67	1,63	1,67	1,68	1,77	1,79	1,77
Q_{PP} (kN/m)	9,45	7,17	4,96	6,14	7,00	8,53	7,01	7,81	9,07

	Batache #4			Batache #5			Batache #6		
	4S	4C	4I	5S	5C	5I	6S	6C	6I
ρ_m (g/cm ³)	2,104	2,104	2,104	2,076	2,076	2,076	2,160	2,160	2,160
h_{EQ} (m)	0,190	0,200	0,210	0,151	0,200	0,303	0,159	0,200	0,286
b_{EQ} (m)	1,69	1,73	1,71	1,63	1,73	1,68	1,68	1,70	1,71
Q_{PP} (kN/m)	6,76	7,27	7,55	5,11	7,16	10,59	5,75	7,36	10,57

Tabla 5.10. Carga de peso propio (Q_{PP}), entre apoyos, de cada losa

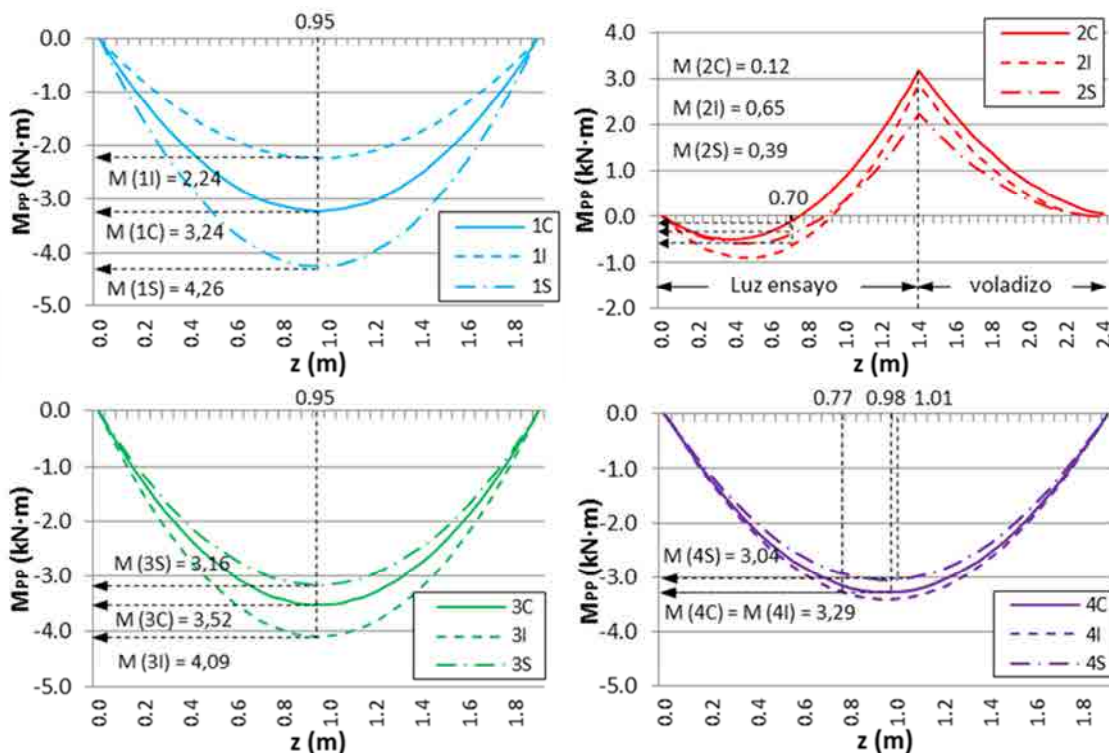
La carga de peso propio actuante entre apoyos oscila entre los 4,96 kN/m correspondiente a la losa 1I, hasta los 10,59 kN/m en la losa 6I. Las diferencias existentes entre losas, de hasta el 113 %, se deben principalmente a la disparidad entre sus espesores equivalentes (h_{EQ}), que son de 0,140 y 0,286 m, respectivamente.

Del mismo modo, en la Tabla 5.11 se presentan los valores de la carga debida al peso propio actuando sobre el voladizo de las losas obtenidas del batache #2. La magnitud de las cargas de peso propio actuantes sobre el voladizo son menores que las actuantes entre los apoyos situándose entre los 4,44 y los 5,74 kN/m, debido a que la anchura equivalente de la losa (b_{EQ}) se reduce desde los 1,6 - 1,8 metros, hasta apenas 1,1 - 1,2 metros.

Losa	Luz voladizo (m)	Densidad (g/cm ³)	Área planta (m ²)	b_{EQ} (m)	h_{EQ} (m)	q_{PPV} (kN/m)
2C	1,15	2,103	1,314	1,143	0,200	4,81
2S	1,00		1,185	1,185	0,178	4,44
2I	1,00		1,128	1,128	0,242	5,74

Tabla 5.11. Carga de peso propio (q_{PP}), en el voladizo de las losas del batache #2

En la Figura 5.16 se representan las leyes de momento flector debido a la carga de peso propio. En cada una de las seis gráficas (una por batache), se detalla la curva obtenida para las tres losas pertenecientes a cada batache. La forma de las curvas es parabólica de segundo grado, alcanzando en la sección centro luz su valor máximo, e igual a $(Q_{PP} \cdot L^2)/8$.



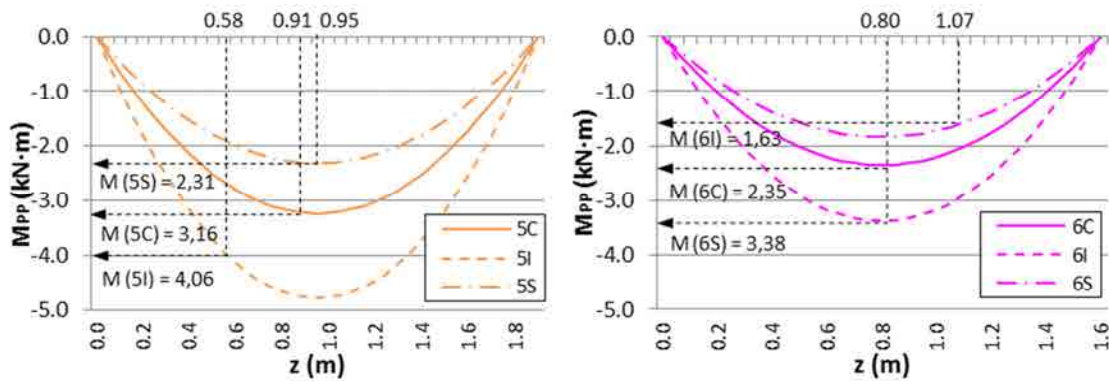


Figura 5.16. Ley de Momentos flectores debida al peso propio de la losa (M_{pp}).
 a) Batache #1, b) Batache #2, c) Batache #3, d) Batache #4, e) Batache #5, f) Batache #6

La magnitud de los esfuerzos resultantes debidos al peso propio de la losa son poco importantes, con valores máximos de hasta 4,3 kN·m, debido a las reducidas luces de ensayo (comprendidas entre 1,4 y 1,9 metros). La única excepción se produce en las losas extraídas del batache #2. El voladizo existente altera significativamente la distribución de esfuerzos correspondientes a las losas 2C, 2S y 2I, provocando momentos positivos de hasta 3 kN·m en el apoyo situado en $z = l = 1,40$ m y un momento prácticamente nulo en la sección centro luz ($z = 0,7$ m).

5.4.2 Cuchillo de carga puntual

La utilización de la viga de reparto HEB, junto con el neopreno colocado entre ella y la losa, hace que la carga puntual realmente no sea tal, sino que actúa como una carga distribuida sobre una banda comprendida entre las secciones $[z_{CL} \pm 0,1$ m]. Este hecho modifica la distribución de la ley de momentos debida a la carga exterior (expresiones [5.8] y [5.9]), tal y como se esquematiza en la Figura 5.17.

Distribución TEÓRICA (Carga puntual F)

$$M_F(z) = -\frac{F}{2}z \quad 0 \leq z \leq l/2 \quad [5.8a]$$

$$M_F(z) = -\frac{F}{2}z + F\left(z - \frac{l}{2}\right) = -F\left(\frac{l-z}{2}\right) \quad l/2 \leq z \leq l \quad [5.8b]$$

Distribución REAL (Carga distribuida $f = F/d_n$)

$$M_F(z) = -\frac{F}{2}z \quad 0 \leq z \leq \frac{l-d}{2} \quad [5.9a]$$

$$M_F(z) = -\frac{F}{2}z + f\left(z - \frac{l-d}{2}\right) \cdot \frac{\left(z - \frac{l-d}{2}\right)}{2} \quad \frac{l-d}{2} \leq z \leq \frac{l+d}{2} \quad [5.9b]$$

$$M_F(z) = -\frac{F}{2}z + f \cdot d \left(z - \frac{l}{2} \right) \quad \frac{l+d}{2} \leq z \leq l \quad [5.9c]$$

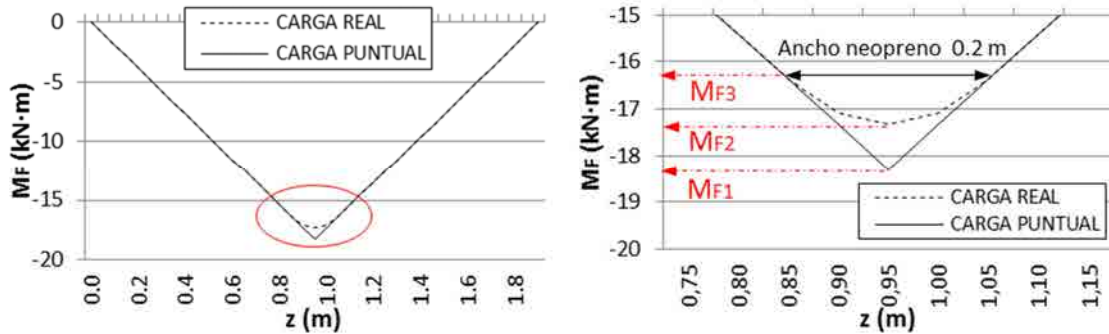


Figura 5.17. Influencia de la viga de reparto sobre la ley de M_f debido a la carga puntual

Debido a la viga de reparto, la ley del momento flector causado por la carga exterior deja de ser triangular con el esfuerzo máximo situado en la sección centro luz (de magnitud igual a $F \cdot l/4$). La nueva distribución reduce en un 5,3 % el valor máximo en dicha sección ($M_{F2} \approx 0,947 \cdot M_{F1}$). A su vez, la diferencia entre el momento actuante en la sección $z = [(l \pm d_n)/2]$ respecto a la sección $z = l/2$ se reduce significativamente y es de apenas el 5,6 % ($M_{F3} \approx 0,944 \cdot M_{F2}$).

Este hecho incrementa la probabilidad de que la fisuración durante el ensayo se produzca en secciones débiles diferentes a $z = l/2$. La diferencia del momento actuante en la sección $[(l \pm d)/2]$ respecto a la sección centro luz $[z = l/2]$, se reduce a apenas el 5,6 %, mientras que la dispersión de la resistencia a tracción del hormigón es superior (entre el 6 y el 21 %), tal y como se mostró anteriormente en la Tabla 5.2.

5.5 RESULTADOS OBTENIDOS

5.5.1 Comportamiento pre-fisuración (Carga de fisuración – carga máxima)

En la expresión [5.10] se especifica el cálculo seccional que debe realizarse para determinar la carga de fisuración teórica. Ésta se ha obtenido a partir de la expresión general [5.1], considerando por un lado, la combinación de esfuerzos provocados por las dos solicitaciones actuantes: peso propio (M_{PP}) y carga puntual (M_F), y por otro, la del momento máximo que puede soportar la sección crítica (M_{CR}), que depende de su geometría y de la resistencia del hormigón.

$$S = M_{PP} + M_F = \frac{Q_{PP} \cdot z_{CR}}{2} (l - z_{CR}) + \frac{F_{CR} \cdot z_{CR}}{2} \equiv \frac{I_X}{y_{CDG}} \cdot f_{ctm,fl} = M_{CR} = R \quad [5.10]$$

donde: z_{CR} : sección crítica de la losa, dada en la Tabla 5.9, en metros.

M_{PP} :	momento debido al peso propio en la sección crítica, en kN·m
M_F :	momento debido al cuchillo de carga en la sección crítica, en kN·m
Q_{PP} :	carga distribuida debido al peso propio, dada en la Tabla 5.10, en kN/m
l :	luz de ensayo, definida en el Apartado 5.3.2, en metros
F_{CR} :	carga puntual que provoca la fisuración de la losa, en kN.
I_X :	Inercia de la sección crítica según el eje x, dada en la Tabla 5.8, en metros ⁴
y_{CDG} :	Distancia desde el CDG de la sección a la fibra inferior, en metros
$f_{ctm,fl}$:	Resistencia media a flexotracción, dada en la Tabla 5.2, en kN/m ²

Con el fin de detectar la influencia que cada una de las variables presentadas anteriormente ejerce sobre los resultados del ensayo, y dadas las diferencias geométricas existentes entre las losas “C” (de canto constante), y las losas “S” e “I” (de canto variable), se cree conveniente analizar de forma separada ambos casos.

Losas “C”

Combinando la expresión genérica [5.10], con la expresión [5.6] (válida únicamente con las losas tipo “C”), se obtiene la expresión [5.11] que proporciona el valor del momento crítico (M_{CR}), que provoca la fisuración en la fibra inferior de la sección.

$$M_{CR} = \frac{I_X}{y_{CDG}} f_{ctm,fl} = \frac{b_{CR} h_{CR}^3}{12} \cdot \frac{1}{\frac{h_{CR}}{2}} \cdot f_{ctm,fl} = \frac{b_{CR} h_{CR}^2}{6} f_{ctm,fl} \quad [5.11]$$

Debe aclararse que, aunque para la obtención de la carga de peso propio realizada anteriormente en el Apartado 5.4.1, se ha trabajado con la geometría homogeneizada, en el cálculo de la carga de fisuración (F_{CR}), se emplea la geometría real de la sección crítica, dada la gran influencia que ejerce la inercia trasnversal, $I_X = f(b_{CR}, h_{CR})$, sobre la respuesta estructural.

En la Tabla 5.12 se presentan los resultados obtenidos de las seis losas “C” ensayadas. Los valores mostrados en ella se han obtenido de la siguiente forma:

1. Sección crítica de cada losa: definida por su coordenada z (z_{CR}) o el parámetro adimensional $\alpha = z_{CR}/L$. (ambos extraídos de la Tabla 5.9).
2. Inercia de la sección crítica (I_X): calculada a partir de su geometría (Tabla 5.8)
3. Resistencia a flexotracción ($f_{ctm,fl}$): dada anteriormente en la Tabla 5.2.
4. Momento crítico de fisuración (M_{CR}): calculado a partir de la expresión [5.11]
5. Momento debido al peso propio actuante en la sección crítica (M_{PP}): obtenido con la Figura 5.19.
6. Momento debido al cuchillo de carga (M_F): desarrollando la expresión [5.10]

$$S = M_{PP} + M_F = M_{CR} = R \rightarrow M_F = M_{CR} - M_{PP}$$

7. Carga crítica teórica (F_{CR}): a partir de las expresiones [5.9], que relacionan la carga aplicada (F) y el valor del momento (M_F) generado.
8. Carga de fisuración experimental (F_{EXP}): dato registrado experimentalmente
9. Parámetro adimensional ξ : a partir de la expresión [5.12]

$$\xi = \frac{F_{CR}}{F_{exp}} \quad [5.12]$$

Losa	Z_{CR} (m)	α	I_x (m ⁴)	$f_{ctm,\phi}$ (MPa)	M_{CR} (kN·m)	M_{PP} (kN·m)	M_F (kN·m)	F_{CR} (kN)	F_{EXP} (kN)	ξ (-)
1C	0,95	0,50	0.001127	3,08	34,71	3,24	31,47	69,93	38,52	1,800
2C	0,70	0,50	0.001127	3,35	37,74	0,12	37,62	115,8	59,21	1,955
3C	0,95	0,50	0.001207	2,74	33,06	3,52	29,54	65,64	48,67	1,349
4C	0,98	0,52	0.001147	3,18	36,47	3,29	33,18	74,11	55,86	1,327
5C	0,91	0,48	0.000967	2,63	25,42	3,16	22,26	49,92	40,51	1,232
6C	0,80	0,50	0.001133	3,28	37,17	2,35	34,82	92,86	85,43	1,087

Tabla 5.12. Cargas críticas teórica (F_{CR}) y experimental (F_{EXP}) de las losas "C"

En los seis ensayos realizados, la carga que produce la fisuración de la losa (F_{EXP}) es inferior a la teóricamente esperada (F_{CR}). Las mayores diferencias entre resultados experimentales y teóricos, corresponden a las losas 1C y 2C. En éstas, la fisuración se produce con una carga experimental igual al 55 % ($\xi = 1,800$) y al 51,1 % ($\xi = 1,955$) de la carga teórica, respectivamente. En el lado opuesto, los dos valores de ξ más cercanos a 1,00 se obtienen con las losas 5C y 6C, ambas ejecutadas con HRF.

Un resultado a destacar de la Tabla 5.12, es la baja influencia que ejerce el peso propio de la losa sobre el ensayo de flexión. El hecho de que las luces de ensayo estén comprendidas entre 1,40 y 1,90 metros, reduce significativamente la influencia ejercida por el peso propio de la losa en el ensayo ($M_{PP}/M_{CR} \sim 0,10$), recayendo sobre el cuchillo de carga puntual la mayor proporción del esfuerzo provocado ($M_F/M_{CR} \sim 0,90$). Lo cual se asemeja al comportamiento real de un muro-pantalla, donde su peso propio resulta un factor de escasa influencia.

A fin de disponer de mayor información para entender los resultados obtenidos, es conveniente realizar el cálculo inverso. Con esta metodología, expuesta a continuación, se determina la tensión existente en la fibra inferior de la sección crítica (Z_{CR}) para la carga experimental que provoca la rotura de la losa (F_{EXP}). Posteriormente, se compara el valor obtenido con la resistencia media a tracción, mediante el parámetro adimensional ϕ .

1. Sección crítica de cada losa: definida por su coordenada z (z_{CR}) o el parámetro adimensional $\alpha = z_{CR}/L$. (ambos extraídos de la Tabla 5.9).
2. Inercia de la sección crítica (I_x): calculada a partir de su geometría (b, h).
3. Momento debido al peso propio actuante en la sección crítica (M_{PP}): obtenido con la Figura 5.16.
4. Momento del cuchillo de carga (M_F), debido a la carga de rotura experimental (F_{EXP}), a partir de las expresiones [5.9]
5. Momento total actuante (M_S) sobre la sección crítica en el instante que fisura, definido como $M_S = M_{PP} + M_F$
6. Obtención de la tensión existente en la fibra inferior de la sección crítica (σ_{INF}), provocada por el momento actuante M_S , aplicando la expresión [5.13].

$$M_S = \frac{I_x}{y_{CDG}} \sigma_{INF} \rightarrow \sigma_{INF} = \frac{M_S}{I_x} y_{CDG} \quad [5.13]$$

7. Parámetro estadístico adimensional ϕ : a partir de la expresión [5.14]

$$\sigma_{INF} = \bar{f}_{ct} - \phi \cdot \bar{s} \rightarrow \phi = \frac{\bar{f}_{ct} - \sigma_{INF}}{\bar{s}} \quad [5.14]$$

Losa	Z_{CR} (m)	α	I_x (m ⁴)	M_{PP} (kN·m)	F_{EXP} (kN)	M_F (kN·m)	M_S (kN·m)	σ_{INF} (MPa)	f_{ctm} (MPa)		ϕ (-)
									\bar{x}	s	
1C	0,95	0,50	0.001127	3,24	38,52	17,33	20,57	1,83	3,08	0,37	3,37
2C	0,70	0,50	0.001127	0,12	59,21	19,24	19,36	1,72	3,35	0,39	4,18
3C	0,95	0,50	0.001207	3,52	48,67	21,90	24,42	2,02	2,74	0,31	2,32
4C	0,98	0,52	0.001153	3,29	55,86	25,01	28,39	2,46	3,18	0,29	2,48
5C	0,91	0,48	0.000940	3,16	40,51	18,06	21,22	2,26	2,63	0,34	1,09
6C	0,80	0,50	0.001140	2,35	85,43	32,04	34,39	3,02	3,28	0,27	0,96

Tabla 5.13. Estudio de sensibilidad. Resistencia a flexión. Parámetro ϕ

Relacionando los datos mostrados en las tablas anteriores (Tabla 5.12 y Tabla 5.13), se confirma que la fisuración prematura de las seis losas analizadas se debe principalmente a dos motivos: una concentración de tensiones sobre la sección crítica y/o una sección crítica débil, de resistencia muy inferior al de las secciones adyacentes. La causa que provoca la rotura prematura de la losa puede establecerse en función del parámetro ϕ obtenido en cada caso.

En las losas 1C y 2C, la carga experimental de rotura (P_{EXP}), produce, en teoría, sobre la fibra inferior de la sección crítica, una tensión muy inferior a la resistencia a tracción del hormigón. El parámetro obtenido en ambos casos ($\phi > 3$), indica que la probabilidad de que las secciones críticas de las losas 1C y 2C, tuvieran un valor de

resistencia a tracción de apenas 1,83 y 1,72 MPa, es mínima (inferior al 0,1 %). Con estos resultados, se descarta que la fisuración en dichas losas se produzca a causa de una sección débil.

a) $\xi > 1,6$: Concentración de tensiones debido a la geometría no adecuada

La causa que provoca la rotura prematura de las losas 1C y 2C, es la no planeidad de la cara inferior de estas losas, provocada por la interferencia de una barra de acero durante el proceso de corte de los batches. Este hecho provoca que la superficie de contacto entre la losa y los caballetes de apoyo no sea el adecuado, y por ende, que la distribución de tensiones debida al cuchillo de carga no sea homogénea en todo el ancho de la losa.

Consecuentemente, la rotura se inicia por en la zona con mayor concentración de tensiones, cuando en esta se alcanza el valor de la resistencia a tracción. Finalmente, una vez iniciada la fisuración, la losa pierde parte de su inercia seccional, y la fisura se propaga por todo el ancho de la losa. Las afirmaciones realizadas quedan demostradas en base a las fotografías tomadas durante el ensayo (Figura 5.18), así como de los resultados registrados (Figura 5.19).

A modo de ejemplo, en la Figura 5.18a se muestra la magnitud del escalón producido en la superficie de corte entre las losas 4C y 4I. En caso que esta incidencia se produzca en la cara inferior de la losa, y próxima al caballete de apoyo, tal y como sucede en la losa 2C (Figura 5.18b), dicho escalón provoca que contacto entre la losa y el caballete de apoyo no sea el adecuado (Figura 5.18c)

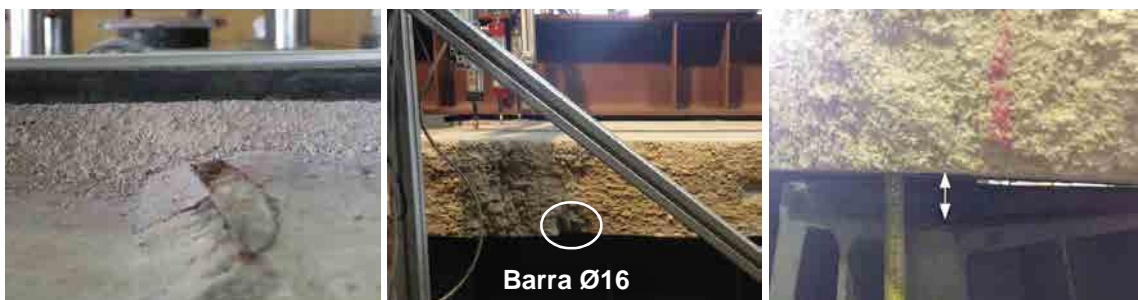


Figura 5.18. Influencia de la barra de acero en el proceso de corte. Superficie no adecuada

En la Figura 5.19 se representan los movimientos verticales registrados (para una carga inferior a F_{EXP}) por los LVDT's colocados sobre la superficie de la losa 2C. En ella, se comparan los desplazamientos del lado izquierdo (línea verde) y del lado derecho de la losa (línea roja), respecto a los desplazamientos teóricos (cruces azules), obtenidos a partir de la ecuación de la elástica de una biga biapoyada con carga puntual F , aplicada en la sección centro luz (expresión [5.15]).

$$\delta(z) = \frac{F \cdot l^2 \cdot z}{16EI_X} \cdot \left(1 - \frac{4z^2}{3l^2}\right) \rightarrow \delta_{max} \left(z = \frac{l}{2}\right) = \frac{F \cdot l^3}{48EI_X} \quad [5.15]$$

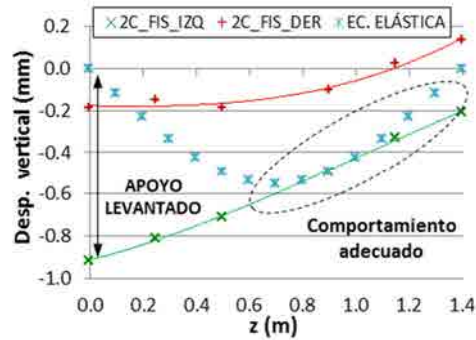


Figura 5.19. Desplazamientos verticales registrados en la losa 2C (hasta fisuración)

Los desplazamientos registrados en el lado izquierdo de la losa 2C demuestran que ésta no se comporta como una viga biapoyada, sino más bien como un mecanismo que pivota alrededor del apoyo posterior situado en $z = 1,40$ m.

b) $1,0 < \xi < 1,6$: Sección crítica débil

Aunque la carga de rotura experimental (F_{EXP}), sea inferior a la prevista teóricamente (F_{CR}), la tensión provocada por la primera se sitúa dentro del rango de resistencias a flexión $[\bar{x} - 2,5 \cdot s; \bar{x} + 2,5 \cdot s]$. Por tanto, las diferencias existentes entre las F_{EXP} y las F_{CR} , se deben a causa de suponer que la resistencia a flexión en toda la losa es constante e igual a $f_{ctm, fl}$.

En este sentido, Exteberría *et al.* (2007a) ya detectó la aparición de roturas prematuras en vigas de hormigón fabricadas con árido reciclado de hormigón debido a la presencia de puntos débiles, incluso para porcentajes de sustitución del 25 %. Ello confirma la heterogeneidad de los elementos ensayados, siendo poco realista trabajar, en este tipo de hormigones, con los valores medios de las propiedades mecánicas, tales como la resistencia media a tracción (f_{ctm}).

Losas "S" e "I"

En la Tabla 5.14 se presentan los resultados relacionados con las cargas de fisuración de las losas de espesor variable "S" e "I", realizando una comparativa entre la carga de fisuración teórica (F_{CR}), y la carga experimental (F_{EXP}). El procedimiento adoptado es idéntico al utilizado anteriormente para el análisis de las losas "C".

En ocho de los doce casos analizados, la carga de fisuración experimental es menor que la teórica ($\xi > 1,00$), mientras que en cuatro casos (losas 2S, 3I, 4S y 5S), se produce la situación contraria. Según los valores de ξ obtenidos, las losas pueden clasificarse en función de la causa que ha producido la fisuración.

Losa	Z_{CR} (m)	α	I_x (m ⁴)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	M_{CR} (kN·m)	M_{PP} (kN·m)	M_F (kN·m)	F_{CR} (kN)	F_{EXP} (kN)	ξ (-)
1S	0,95	0,50	0,003588	3,08	75,18	4,26	70,92	157,6	103,1	1,529
1I	0,95	0,50	0,000158		9,21	2,24	6,97	15,49	13,75	1,127
2S	0,70	0,50	0,000613	3,35	24,73	0,39	24,34	74,89	78,63	0,952
2I	0,70	0,50	0,001233		37,55	0,65	36,90	113,6	94,72	1,199
3S	0,95	0,50	0,001489	2,74	35,81	3,16	32,65	72,55	10,03	7,233
3I	0,95	0,50	0,000901		25,47	4,09	21,38	47,50	71,67	0,662
4S	1,01	0,53	0,000910	3,05	28,92	3,04	25,88	59,63	67,58	0,882
4I	0,77	0,41	0,001895		48,16	3,29	44,87	116,5	77,97	1,495
5S	0,95	0,50	0,000645	2,63	19,95	2,31	17,64	39,55	45,68	0,866
5I	0,58	0,31	0,002575		50,06	4,06	46,00	158,6	66,40	2,389
6S	1,07	0,67	0,000820	3,28	28,92	1,58	27,34	95,93	95,19	1,008
6I	0,79	0,49	0,002462		62,13	3,38	58,75	156,7	114,7	1,366

Tabla 5.14. Cargas críticas teórica (F_{CR}) y experimental (F_{EXP}) de las losas "S" e "I"

En dos de las losas ensayadas (3S y 5I), la fisuración se produce para cargas muy inferiores de la carga crítica teórica, con $\xi \gg 2$. La variabilidad de las propiedades mecánicas del hormigón con el que se han ejecutado los batches no justifican las diferencias superiores al 100 %, entre F_{CR} y F_{EXP} . En ambos casos, la fisuración prematura se debe a que la losa estaba fisurada de forma previa a la realización del ensayo, por lo que su capacidad resistente obtenida en el ensayo es muy inferior a la obtenida en los cálculos.

a) $\xi > 2$: Losa prefisurada

La losa 3S, con un valor de $\xi = 7,23$ estaba fisurada de forma previa a la realización del ensayo, durante el cual apenas soportó una fuerza máxima de 10 kN ($F_{CR} = 72,55$ kN). Esta afirmación queda demostrada a partir de las gráficas que componen la Figura 5.20.

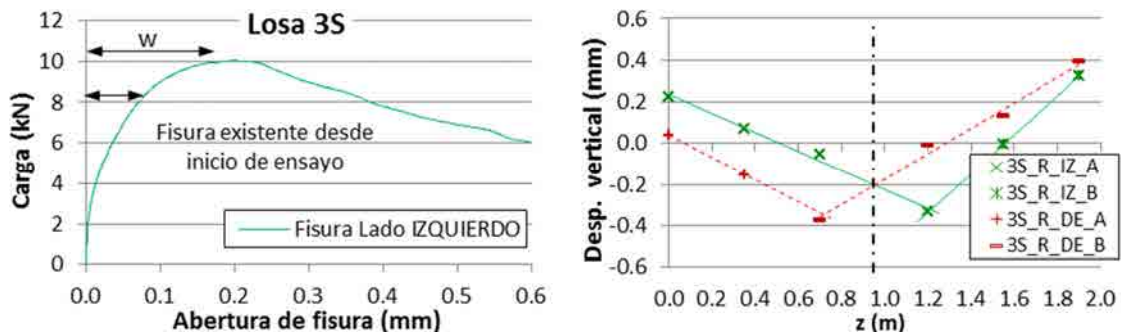


Figura 5.20. Losa 3S. a) Diagrama P-w, b) Diagrama desplazamiento vertical - z

En la Figura 5.20a se muestra el gráfico, carga – abertura de fisura registrado en el lado izquierdo de la losa (en el lado derecho, la fisura no quedo registrada al producirse fuera del rango evaluado por el LVDT). En ella se observa como la abertura de fisura aumenta ya desde el inicio de ensayo, lo que indica su presencia, en vez de mantenerse nula hasta que alcanza la carga máxima.

En la Figura 5.20b se representan los movimientos verticales registrados, para una carga $F < F_{EXP} = 10,03$ kN, por los LVDT's colocados sobre en el lado izquierdo (línea verde) y derecho (línea roja) de la losa. El hecho de que los puntos se encuentren alineados demuestra que la losa no se encuentra en régimen elástico, donde el desplazamiento máximo debería producirse en el centro luz de la losa ($z_{CL} = 0,95$ m), sino que se comporta como un mecanismo de sólido rígido, alcanzando los mayores desplazamientos para un valor de z , que coincide con la fisura ya existente.

El segundo caso donde se obtiene un valor de $\xi = 2,39 > 2,00$, es la losa 5I. Cabe recordar que en las losas obtenidas del batache #5, ya se había observado la presencia de una pre-fisura, que unía una coquera con la cara lateral de las losas, tal y como se mostró en la Figura 5.13. Este hecho, ya fue considerado en el cálculo de la inercia de la sección, reduciendo el ancho eficaz desde hasta 1,17 metros.

Sin embargo, a partir del mapa de fisuras que se presenta en la Figura 5.21, realizado a partir del registro llevado a cabo tras el ensayo de la losa 6I, se comprueba que dicha fisura se prolonga hasta la sección del apoyo ($z = 0$), lo que comporta que el ancho eficaz real de dicha losa es de apenas 0,80 metros. La pre-fisura, además de reducir considerablemente la carga que provoca la fisuración, condiciona la localización de la fisura generada durante el ensayo, provocando que la sección crítica ($z_{CR} = 0,58$ m), se encuentre alejada de la sección centro luz ($z_{CL} = 0,95$ m)

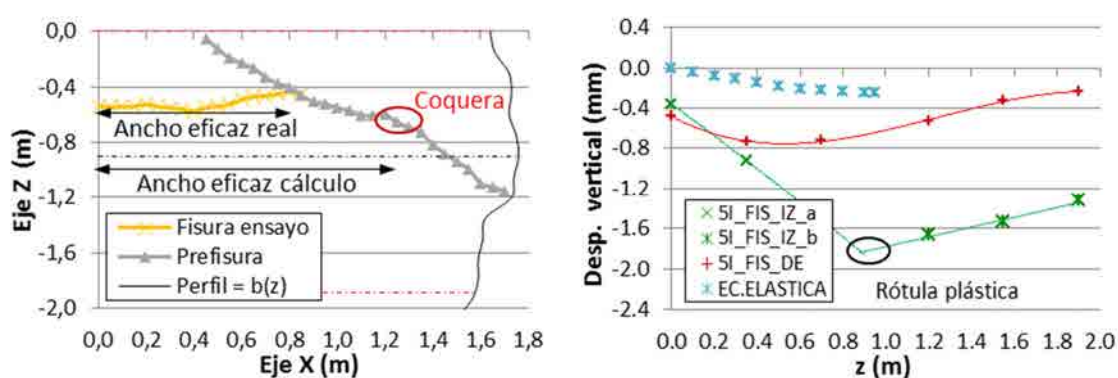


Figura 5.21. Losa 3S. a) Diagrama P-w, b) Diagrama desplazamiento vertical - z

En la Figura 5.21b se muestran los desplazamientos verticales a ambos lados de la losa 5I. Los registros se corresponden a una carga inferior a la carga de fisuración ($F < F_{EXP} = 66,4$ kN). Puede observarse el diferente comportamiento entre el lado izquierdo (línea verde) y el lado derecho (línea roja). Mientras el lado derecho, aun sin fisurar, sigue un

comportamiento elástico, el lado izquierdo, ya fisurado, se comporta como un sólido rígido, rotando alrededor de la rótula plástica.

En la Tabla 5.15 se presenta el resultado asociado a la carga de fisuración de la losa 5I, reconsiderando la geometría real (ancho eficaz = 0,80 m). Con esta modificación, el parámetro ξ disminuye significativamente, desde 2,389 hasta 1,340.

Losa	Z_{CR} (m)	α	I_x (m ⁴)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	M_{CR} (kN·m)	M_{PP} (kN·m)	M_F (kN·m)	F_{CR} (kN)	F_{EXP} (kN)	ξ (-)
5I	0,58	0,31	0,001761	2,63	29,87	4,06	25,81	89,00	66,40	1,340

Tabla 5.15. Cargas críticas teórica (F_{CR}) y experimental (F_{EXP}) para la losa 5I (b eficaz real)

b) $1,0 < \xi < 1,6 \rightarrow$ Sección crítica débil y/o geometría transversal irregular

En las losas 1S, 1I, 2I, 4I, 6S y 6I, se obtiene un parámetro ξ comprendido entre 1,0 y 1,6, lo que supone que la fisuración se produce para una carga experimental inferior a la teórica. En las losas tipo “C”, esta situación se ha relacionado con la presencia de una sección débil, de resistencia inferior a la resistencia media ($f_{ctm,fl}$) empleada en el cálculo de la respuesta estructural.

Sin embargo, las losas “S” e “I”, introducen una nueva variable en el cálculo de la respuesta estructural: la variación del espesor de losa en la sección transversal $f = h(x)$. Tal y como se mostró anteriormente en la Tabla 5.8, la inercia de las losas se obtuvo a partir de los espesores de la losa en cada una de las superficies laterales (h_1 y h_2), suponiendo que la pendiente transversal es constante e igual a $i = (h_1 - h_2)/b$. (Sección trapezoidal).

Sin embargo, la geometría real de la losa presenta importantes irregularidades en sentido transversal que no pudieron evaluarse durante las tareas de replanteo. Dicha irregularidad, debida a la rugosidad de la superficie de contacto estructura – terreno, puede provocar notables diferencias entre la inercia seccional real y la estimada (Tabla 5.8), tal y como se esquematiza en la Figura 5.22.

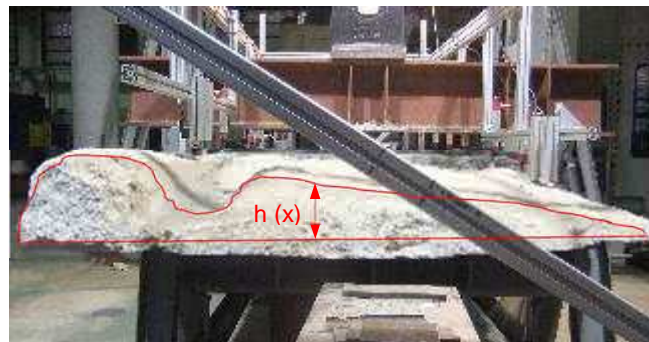
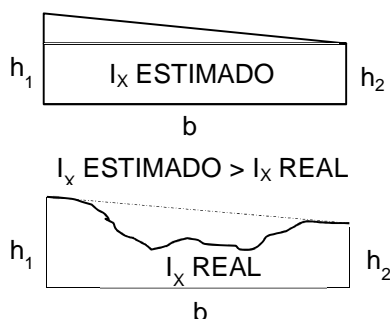


Figura 5.22. Influencia de la rugosidad transversal en la inercia I_x . a) Esquema, b) Losa 1S

Además de influir sobre la inercia de la sección, estas irregularidades pueden reducir considerablemente el grosor de la sección en zonas concretas de las losas, que conducen a la fisuración prematura de las mismas.

Del mismo modo que la geometría irregular en sentido transversal (eje X), puede provocar que la inercia seccional de las losas se haya sobreestimado, puede provocar el caso contrario, lo que daría respuesta a los cuatro casos (losas 2S, 3I, 4S y 5S), en que la carga de fisuración experimental obtenida ha sido mayor que la teórica

5.5.2 Comportamiento post-fisuración (losas con refuerzo)

En las gráficas que componen la Figura 5.23, se presentan los diagramas: a) carga – tiempo; y b) carga – abertura de fisura, correspondientes de las nueve losas de HRF, obtenidas de los bataches #2, #5 y #6. Dado que la abertura de fisura se ha evaluado en los dos paramentos laterales de las losas, mediante sendos LVDT's, se adopta como valor de referencia el valor medio de las aberturas registradas por cada uno de ellos.

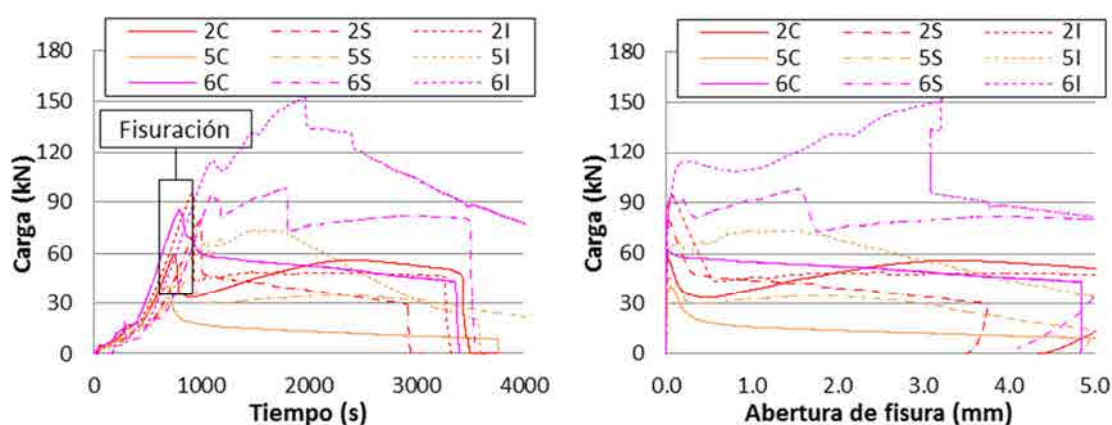


Figura 5.23. Losas HRF. Comportamiento post-fisuración. a) Diagrama F-t, b) F-w

Salvo en las losas 6S y 6I, donde la carga máxima se alcanza de forma posterior a la fisuración, en las siete losas restantes de HRF, la carga de fisuración coincide con la carga máxima o última (F_{CR}). Esta situación se debe a que el refuerzo de 20 kg/m³ de fibras de acero resulta insuficiente para poder desarrollar un comportamiento post-fisuración tipo *hardening*, en línea con los datos de resistencia residual mostrados anteriormente en la Tabla 5.3. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las losas reforzadas únicamente con fibras de acero (losas 2S, 6C, 5C, 5S y 5I) o con barra de acero (losa 3I);

Refuerzo exclusivo de fibras de acero: Losas 2S, 5S, 5C, 5I, 6C

En la Figura 5.24 se muestran los diagramas F-w, de las losas 2S, 5S, 5C, 5I y 6C, reforzadas, únicamente con fibras de acero. En cada una de las gráficas, se representan y comparan, las cargas (F) asociadas a una abertura de fisura de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm.

Por un lado, la línea verde de trazo continuo se corresponde con las cargas experimentales (F_i EXP) obtenidas durante el ensayo de las losas. Y por otro, la línea roja discontinua, muestra las cargas teóricamente esperadas (F_{CR}). Éstas últimas han sido calculadas a partir de los valores de resistencia residual a flexión, $f_{R,i}$, (detallados anteriormente en la Tabla 5.3), y que fueron obtenidos del ensayo UNE-EN 14651:2007 sobre los testigos prismáticos de 150 x 150 x 600 mm

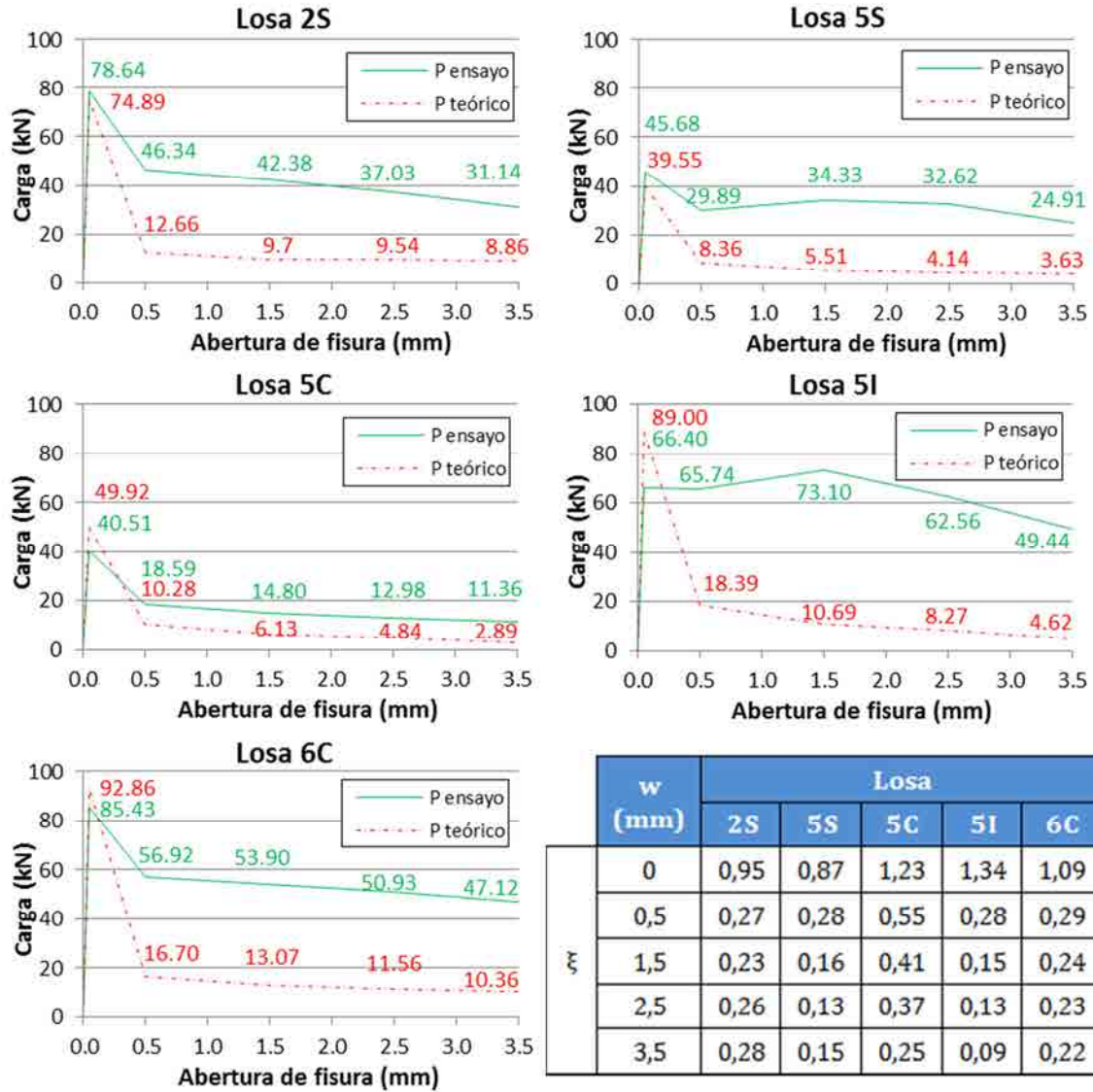


Figura 5.24. Diagrama P-w. Losas HRF a) 2S, b) 5S, c) 5C, d) 5I, e) 6C, f) Parámetro $\xi = f(w)$

En las cinco losas analizadas, las cargas residuales soportadas experimentalmente son superiores a las esperables teóricamente, con valores del parámetro $\xi = F_{CR}/F_{EXP} \ll 1,0$. Las diferencias entre datos teóricos y experimentales se deben a la poca representatividad de los datos teóricos utilizados en el análisis (Tabla 5.3), respecto al ensayo de las losas realizado, debido a una diferente contribución de las fibras.

Por un lado, el comportamiento post-fisuración obtenido durante el ensayo de las losas (línea verde), viene dado por el contenido de fibras orientadas verticalmente, según el eje Z (fibras efectivas), que se encargan de coser la fisura producida. En cambio, los datos de resistencia residual teóricos (f_{Ri}), tomados como referencia en el análisis, se obtuvieron del ensayo a flexotracción de los testigos prismáticos de 150 x 150 x 600 mm. En este caso, las fibras que contribuyeron al cosido de la fisura generada durante el ensayo UNE-EN 14651:2007, fueron aquellas orientadas según el eje Y.

Aunque el contenido de fibras en los bataches no presenta grandes variaciones (oscilando entre 10 y 25 kg/m³), la orientación de las mismas sí que lo hace (tal y como se mostró en la Figura 4.19), motivado por fenómenos como el efecto pared, descrito por Blanco (2013), o la dirección de vertido con tubo *tremie*. Esta diferente disposición de las fibras, modifica el comportamiento post-fisuración del elemento a ensayar (ya sea la losa o una probeta-testigo), de forma análoga a como varía el contenido de fibras efectivo, definido según la expresión [5.16]

$$C_{f\text{ efectivo}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = C_{f\text{ total}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot \% \text{ fibras eje } (i) \quad [5.16]$$

con i : dirección perpendicular al plano de fisuración

Para ejemplificar lo comentado en el párrafo anterior, en la Tabla 5.16 se detalla el contenido de fibra (total y efectivo) obtenido al aplicar el método inductivo sobre: (a) los testigos cúbicos obtenidos del despiece de los testigos prismáticos 150 x 150 x 600 cm, y (b) los testigos cilíndricos 90 x 90, obtenidos del despiece de los testigos cilíndricos longitudinales (TCZ).

Testigos cúbicos 150 (TP)				Testigos cilíndricos 90 x 90 (TCZ)			
Batache	#2	#5	#6	Batache	#2	#5	#6
Cf (kg/m ³)	19,8	13,4	18,1	Cf (kg/m ³)	18,8	17,5	21,2
% eje Y	27,9	33,6	24,7	% eje Z	40,6	30,0	48,1
Cf efectivo (kg/m ³)	5,5	4,5	4,5	Cf efectivo (kg/m ³)	7,4	5,2	10,2

Tabla 5.16. a) Testigos cúbicos 150 mm; b) Testigos cilíndricos 90 x 90 mm

Se aprecia como el contenido de fibras efectivo en los testigos cilíndricos 90 x 90 mm, suponen el 40,6, el 30,0 y el 48,1 % del total, para los bataches #2, #5 y #6, respectivamente. Este porcentaje se reduce significativamente en el caso de los testigos cúbicos 150 mm, hasta el 27,9, 33,6 y 24,7 % del total, para los bataches #2, #5 y #6, respectivamente.

Además, parte de dichas fibras de acero presentes en los testigos prismáticos quedaron seccionadas durante el proceso de corte. Al perder parte de su longitud de anclaje, la eficiencia de estas fibras, frente al cosido de la fisura, no es óptima.

Consecuentemente, las resistencias residuales, f_{Ri} , obtenidas durante el ensayo de los testigos prismáticos se ven alteradas negativamente, obteniendo resistencias muy inferiores a las representativas de la estructura en su conjunto.

La mayor proporción de fibras orientadas verticalmente (eje Z), se traduce en un mayor número de fibras cosiendo la fisura producida durante el ensayo de flexión de las losas, y por ende, en un comportamiento post-fisuración mucho más resistente de lo esperado.

A fin de entender las diferencias obtenidas, se opta por volver a realizar el cálculo seccional sobre la sección fisurada, pero incluyendo el valor de la resistencia residual (f_{Ri}) entre las incógnitas. El sistema de ecuaciones a resolver, de dos ecuaciones y dos incógnitas (C y f_{Ri}), es el mostrado en la Figura 5.25, y cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.17.

Losa	b (m)	h (m)	w (mm)	F_{EXP} (kN)	M_F (kN·m)	M_W (kN·m)	C (kN)	f_{Ri} (MPa)	f_{Ri} TP (MPa)
2S	1,70	0,17	0,5	46,34	16,22	16,61	200,1	2,13	0,61
			1,5	42,38	14,83	15,22	183,4	1,95	0,48
			2,5	37,03	12,96	13,35	160,8	1,71	0,42
			3,5	31,14	10,90	11,29	136,0	1,45	0,38
5S	1,67	0,17	0,5	29,89	14,19	16,50	194,1	2,05	0,80
			1,5	34,33	16,31	18,62	219,1	2,31	0,61
			2,5	32,62	15,49	17,80	209,4	2,21	0,55
			3,5	24,91	11,83	14,14	166,4	1,76	0,46
5C	1,45	0,20	0,5	18,59	8,46	11,62	116,2	1,20	0,80
			1,5	14,80	6,43	9,89	98,9	1,02	0,61
			2,5	12,98	5,91	9,07	90,7	0,94	0,55
			3,5	11,36	5,17	8,33	83,3	0,86	0,46
5I	1,17	0,30	0,5	65,74	19,06	23,12	154,1	1,32	0,80
			1,5	73,10	21,20	25,26	168,4	1,44	0,61
			2,5	62,56	18,14	22,20	148,0	1,27	0,55
			3,5	49,44	14,34	18,40	122,7	1,05	0,46
6C	1,70	0,20	0,5	56,92	22,77	25,12	251,2	2,21	0,76
			1,5	53,90	21,56	23,91	239,1	2,11	0,64
			2,5	50,93	20,37	22,72	227,2	2,00	0,59
			3,5	47,12	18,85	21,20	212,0	1,87	0,55

Tabla 5.17. Resistencias residuales, f_{Ri} , de las losas de HRF

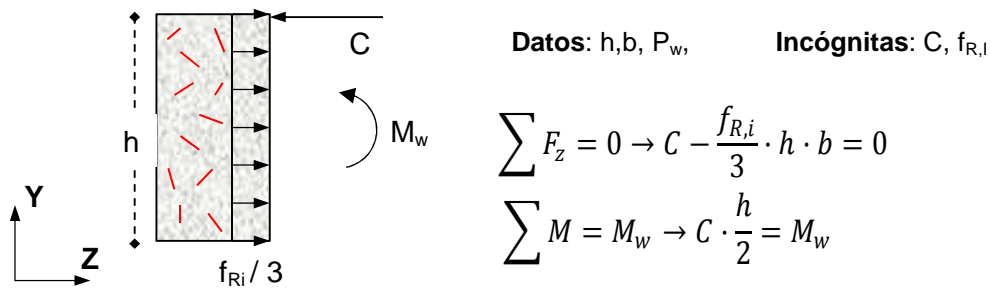


Figura 5.25. Cálculo seccional del HRF, en estado fisurado

Otra consecuencia que se extrae de los resultados analizados es la dependencia de la resistencia residual obtenida, en función de la dirección en la cual actúen las cargas exteriores. Teniendo en cuenta, que el empuje de tierras es la carga actuante más significativa en una pantalla de sostenimiento ejecutado por batches, se cree conveniente tomar como resultado representativo el comportamiento post-fisuración, definido por los valores de $f_{R,i}$ detallados en la Tabla 5.18, y pertenecientes al ensayo de las losas.

	Abertura de fisura	Losa 2S	Losa 5S	Losa 5C	Losa 5I	Losa 6C
$f_{R,i}$ (N/mm ²)	w = 0,5 mm	2,13	2,05	1,20	1,32	2,21
	w = 1,5 mm	1,95	2,31	1,02	1,44	2,11
	w = 2,5 mm	1,71	2,21	0,94	1,27	2,00
	w = 3,5 mm	1,45	1,76	0,86	1,05	1,87

Tabla 5.18. Resistencias residuales ($f_{R,i}$) obtenidas del ensayo de losas

Refuerzo de Barra $\Phi 16$: Losa 3I

En la Tabla 5.19 se presentan los resultados obtenidos tras aplicar las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad (detalladas en la Figura 5.26), sobre la sección crítica de la losa 3I, en su fase fisurada.

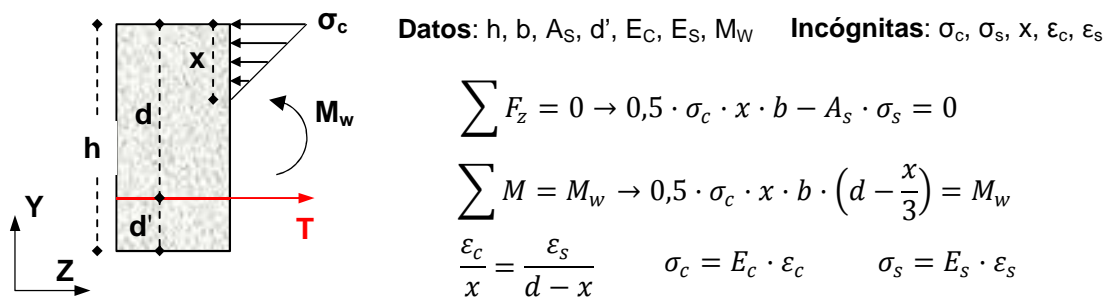


Figura 5.26. Cálculo seccional de la losa 3I, en estado fisurado

El sistema de ecuaciones resultante es de 5 ecuaciones: dos de equilibrio, una de compatibilidad, y dos que relacionan tensiones (σ) y deformaciones (ϵ); y 5 incógnitas: las

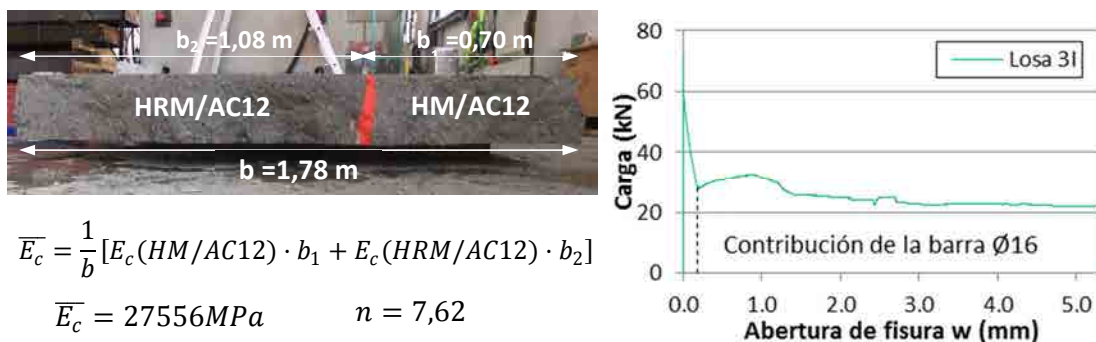
tensiones y deformaciones, tanto en el hormigón (σ_c , ϵ_c), como en la barra de acero (σ_s , ϵ_s), y la profundidad de la fibra neutra (x), correspondiente a las cargas residuales (P_w), asociadas a las aberturas de fisura (w) igual a 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm. Estos resultados se han obtenidos a partir de datos geométricos de la sección crítica, como el ancho (b), el canto (h) y la distancia de la barra de acero a la fibra superior (d), cuyos valores se adjuntan en la tabla.

	w (mm)	b (m)	d (m)	h (m)	n	P_w (kN)	M_w (kN·m)	x (mm)	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)
LOSA 3I	0,5	1,78	0,145	0,195	7,62	30,87	13,89	14,96	7,45	493,6
	1,5					25,59	11,52	14,96	6,17	409,2
	2,5					24,88	11,20	14,96	6,00	397,8
	3,5					22,67	10,20	14,96	5,47	362,5

Tabla 5.19. Losa 3I. $\sigma = f(w)$ en el hormigón y en la barra de acero

La profundidad de la fibra neutra (x) es igual a 14,96 mm, lo que supone que el 92,5 % de la sección se encuentra traccionada, y únicamente el 7,5 % comprimida. La tensión de compresión en la fibra superior de la sección no supera los 8 MPa, por lo que no se produce el machaqueo del hormigón. Por su parte, la barra de acero soporta tensiones muy próximas al límite elástico (500 MPa), que disminuyen paulatinamente a medida que aumenta la abertura de fisura.

Otro parámetro que interviene en el cálculo, y dado en la Tabla 5.19, es el parámetro n (igual a 7,62), que relaciona los módulos de elasticidad del acero ($E_s = 210000$ MPa) y hormigón (E_c). Al tratarse de una sección mixta, compuesta por dos dosificaciones: la patrón HM/AC12 y la HRM/AC12. Se adopta como valor de E_c , el valor proporcional en función de los módulos (dados anteriormente en la Figura 5.4) y de los anchos b_1 y b_2 de cada dosificación en la sección de rotura, tal y como se detalla en la Figura 5.26a.



$$\bar{E}_c = \frac{1}{b} [E_c(HM/AC12) \cdot b_1 + E_c(HRM/AC12) \cdot b_2]$$

$$\bar{E}_c = 27556 \text{ MPa} \quad n = 7,62$$

Figura 5.27. a) Composición de la sección crítica, b) Diagrama P-w de la losa 3I

Para finalizar, en la Figura 5.27b se representa el diagrama P-w de la losa 3I. En él se aprecia claramente la contribución de la barra $\varnothing 16$ mm en el comportamiento post-fisuración de la losa. En este caso particular, la resistencia residual asociada a una

abertura de fisura de 5 mm, alcanza un valor igual al 31 % de la resistencia a flexión máxima, debido a la presencia de la barra de acero situada a 5 cm de la fibra inferior de la sección.

5.6 CONCLUSIONES

- Los resultados del ensayo a flexión de las losas se han visto alterados por la presencia de barras de acero no previstas inicialmente (colocadas para facilitar el izado y retirada de los bataches de la obra), y por una geometría irregular, debido a un proceso de corte defectuoso, y a la rugosidad del contacto entre terreno y estructura.
- Las cargas de fisuración obtenidas son inferiores a las inicialmente previstas. Ello puede deberse a la presencia de microfisuras producidas durante el proceso de obtención de las losas (corte con hilo de diamante); o bien, a una concentración de tensiones en los puntos de menor espesor.
- El contenido de fibras de 20 kg/m³, así como la configuración del ensayo, provoca que la rotura se produzca tras generarse una (o dos) fisura(s), situadas alrededor de la sección más solicitada (centro luz).
- Las cargas residuales en las losas ensayadas de HRF son muy superiores a las teóricamente esperadas (y calculadas según los resultados del ensayo de testigos prismáticos), debido a una mayor número de fibras orientadas verticalmente, y por tanto, contribuyendo al cosido de la fisura producida.

CAPÍTULO 6

EVALUACION DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO Y FIBRAS

6.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos 4 y 5 se han analizado las propiedades físicas y mecánicas del hormigón fabricado con una fracción gruesa compuesta al 100 % por árido reciclado mixto. Los resultados obtenidos han confirmado que, a pesar de sufrir una cierta disminución de propiedades respecto un hormigón convencional (fabricado íntegramente con áridos naturales), su uso es adecuado en aplicaciones estructurales.

En cimentaciones, u otras tipologías en contacto directo con el terreno, el diagnóstico de patologías debidas a la degradación del hormigón es difícil de realizar. Este hecho, unido a los ataques debidos a la presencia de iones en el terreno (sulfatos) o por el nivel freático, hace necesario el empleo de un material resistente a estos agentes. En caso contrario, la capacidad resistente del hormigón puede verse reducida debido a fenómenos relacionados con dichos agentes químicos, tales como la corrosión del acero por cloruros, o la expansión del hormigón por sulfatos, lo que puede conducir a medio o largo plazo, a una merma en la vida útil de la estructura.

Además, la utilización de áridos reciclados mixtos, con un porcentaje significativo de material cerámico u otras impurezas, incrementa la posibilidad de que estos fenómenos se potencien. A los sulfatos que pueden encontrarse en el terreno, deben añadirse los sulfatos internos presentes en el árido reciclado. Cabe recordar que, según la

caracterización de los áridos, detallada en el Capítulo 3, el % de material cerámico presente en los áridos 4/12-T-R y 12/20-T-R era del 6,7 y del 15,5 %, respectivamente. Mientras que el contenido de impurezas (entre los que se encontraba yeso o vidrio) era del 1,9 y del 3,7 %.

El **objetivo** del presente capítulo es demostrar la viabilidad, en términos de durabilidad, del uso de este tipo de hormigones tipologías estructurales sometidas a ambientes de exposición agresivos, cuya fracción gruesa está compuesta al 100% por áridos reciclados mixtos.

Para demostrar este objetivo, se plantea la campaña experimental de ensayos de durabilidad dada en la Tabla 6.1. De estos ensayos, el ensayo de penetración de agua bajo presión se realizó sobre las probetas moldeadas en planta (1ª campaña experimental), con los mismos hormigones que posteriormente se ejecutaron los bataches de la prueba piloto. En cambio, el ensayo de penetración de cloruros y el ensayo de expansión debido a la reacción sulfática interna se realizaron sobre los testigos extraídos de dichos bataches, una vez fueron retirados de la obra. Concretamente, los testigos se obtuvieron del despiece de los testigos cilíndricos transversales (TCY), pertenecientes a la parte derecha del batache, tal y como muestra la Figura 6.1.

Ensayo	Agente actuante	Duración
Prof. de penetración de agua bajo presión	Agua a presión de 500 kPa	72 horas
Expansión por sulfatos internos	Inmersión en agua destilada	187 días
Frente de penetración de cloruros	Inmersión en solución de NaCl 165g/l	205 días

Tabla 6.1. Ensayos de durabilidad realizados

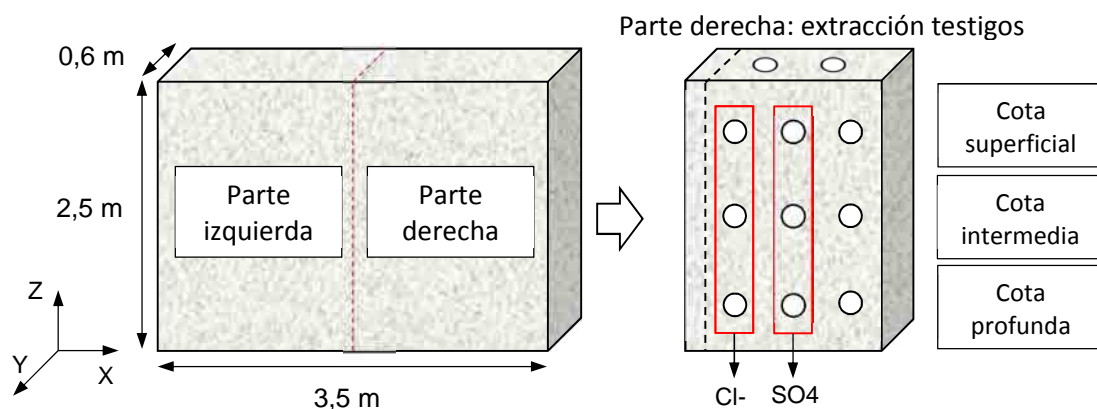


Figura 6.1. Ensayos de durabilidad. Localización de las probetas ensayadas en los bataches

Tanto para el ensayo de penetración de cloruros, como para el ensayo de expansión por ataque sulfático, se destinaron un total de tres TCY, cada uno de ellos perteneciente a una cota diferente del batache: superficial, intermedia y profunda. Las

dimensiones originales de dichos testigos eran: 92 mm de diámetro y 600 mm de longitud. Sin embargo, a fin de disponer de un mayor número de elementos a ensayar, los testigos se fragmentaron en tres partes iguales de 20 cm de longitud. En definitiva, para cada uno de los dos ensayos se han destinado un total de 54 testigos (9 por batache), habiéndose determinado previamente al ensayo de durabilidad, las dimensiones, el peso específico y la velocidad de ultrasonidos, presentándose los resultados en el ANEJO D.

6.2 ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

Para el ensayo de penetración de agua bajo presión se utilizó una probeta cilíndrica de 150 x 150 mm por cada dosificación, excepto para la HRF/AC12-35a. Estas probetas fueron moldeadas durante la 1ª campaña experimental desarrollada en la planta de hormigonado. En la Figura 6.2 se muestran los frentes de penetración de agua en cada una de las dos mitades obtenidas, una vez finalizado el ensayo y tras proceder a la fragmentación diametral en seco, mediante ensayo brasileño, de las seis probetas.

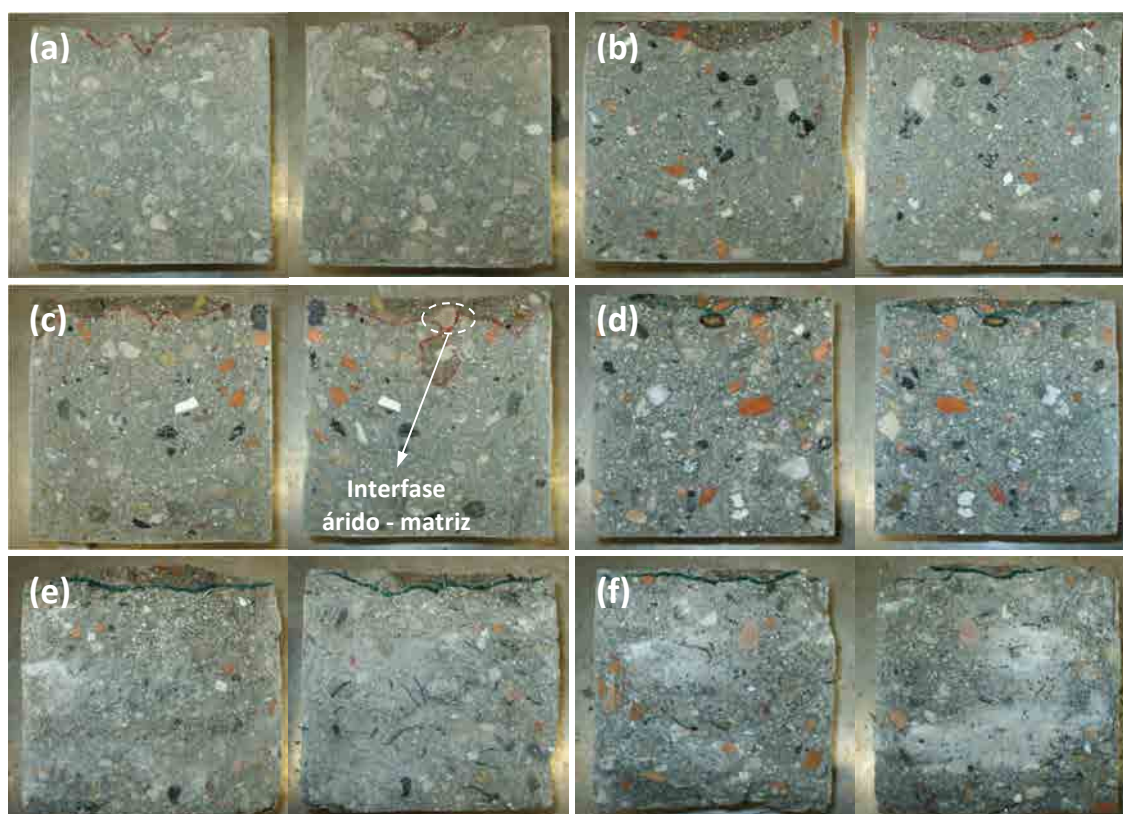


Figura 6.2. Frentes de penetración de agua bajo presión.

a) HM/AC12, b) HRM/AC12, c) HRM/AC20, d) HRM/AC20I, e) HRF/AC12-35, f) HRF/AC20-50

Las imágenes muestran que el agua ha penetrado de forma uniforme en cinco de las seis probetas, con la salvedad de la probeta perteneciente a la dosificación HRM/AC20 (Figura 6.2c). En esta, se presenta una zona de entrada preferencial de agua que coincide con la zona interfacial entre el árido grueso y la pasta. Sin embargo, esta anomalía no

puede relacionarse con el uso de árido reciclado (esta situación apenas se aprecia en la otra mitad de la probeta, ni en el resto de probetas de HRM), sino más bien a un hecho puntual, poniendo de manifiesto una debilidad en esa zona interfacial.

En la Tabla 6.2 se muestran los valores de penetración media (P_{MED}) y máxima ($P_{MÁX}$), obtenidos tras analizar con una herramienta de CaD, las fotografías mostradas en la Figura 6.2, y tomando como referencia el marcado manual realizado. Para cada dosificación, se da el valor medio y la dispersión obtenida a partir de los resultados correspondientes a cada una de las dos mitades de la probeta. El valor de P_{MED} , se ha calculado como el cociente entre el área de penetración (A_P) y el diámetro de la probeta (150 mm).

Campaña en planta	Dosificación	A_P (mm ²)	P_{MED} (mm)	$P_{MÁX}$ (mm)	Porosidad (%)
1ª Fase (14-03-2012)	HM/AC12	465 ± 68	3,2 ± 0,5	17,7 ± 0,9	14,7
	HRM/AC12	1110 ± 46	7,4 ± 0,3	16,8 ± 0,5	17,8
	HRM/AC20 ¹	1814 ± 455	12,1 ± 3,0	39,5 ± 13,7	17,5
2ª Fase (13-04-2012)	HRM/AC20+I	829 ± 118	5,5 ± 0,8	11,7 ± 0,1	13,7
	HRF/AC12-35b	1204 ± 200	8,0 ± 1,3	13,0 ± 0,6	14,2
	HRF/AC20-50	495 ± 166	3,3 ± 1,1	7,0 ± 1,8	14,1
EHE-08 (Art.37.3.3)		-	20 - 30	30 - 50	-

¹ Los resultados de la probeta de la dosificación HRM/AC20, se ven alterados por la penetración puntual mostrada en la Figura 6.2c.

Tabla 6.2. Resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión

Asimismo, la Tabla 6.2 se completa con los datos de porosidad media para cada dosificación obtenidos de las probetas moldeadas en planta, así como los valores máximos de P_{MED} y $P_{MÁX}$ sugeridos por la Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08 (CPH, 2008), a aquellos hormigones expuestos a ambientes de exposición agresivos (III, IV, Q, H, E, F). Hay que destacar que en ningún caso se alcanzan valores de penetración de agua superiores a los propuestos por la Instrucción EHE-08, ni en sus condiciones más exigentes.

Según los resultados recogidos en la Tabla 6.2, la dosificación patrón sin árido reciclado (HM/AC12) presenta la menor profundidad media de penetración ($P_{MED} = 3,2$ mm), como era de esperar al tratarse de áridos con menor capacidad de absorción. Sin embargo, el valor medio de la penetración máxima ($P_{MÁX} = 17,7$ mm), es superior al de resto de series, exceptuando la dosificación HRM/AC20. No se dispone de una explicación clara de este resultado, si bien ya ha sido expuesto por otros autores como Zega y Di Maio (2011), por lo que se requiere observar otras variables, tales como el contenido de árido reciclado o la porosidad, para confirmar si se este resultado se manifiesta sistemáticamente o bien se debe a un caso singular, que no habría que considerar.

Por el contrario, las mayores profundidades de penetración, tanto media ($P_{MED} = 12,1$ mm) como máxima ($P_{MÁX} = 39,5$ mm) corresponden a la probeta perteneciente a la dosificación HRM/AC20. Ambos valores vienen influenciados por la vía de penetración puntual mostrada en la Figura 6.2c. En caso de obviarse esta alteración, las penetraciones media y máxima se reducen a 10,4 y 24,2 mm, respectivamente.

En cualquier caso, las mayores penetraciones de la dosificación HRM/AC20, deben relacionarse con el exceso de agua de saturación utilizada en su fabricación (tal y como se expuso anteriormente en el apartado 3.5), y no con la utilización de los áridos reciclados. Esta afirmación queda confirmada con los resultados obtenidos con las probetas pertenecientes a las dosificaciones HRM/AC20+I, HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50, en las que se utilizaron los mismos áridos reciclados, y en los que se obtienen penetraciones medias un 54,6, 34,0 y 72,8 %, inferiores.

En dichas dosificaciones, todas ellas fabricadas durante la 2ª fase de la 1ª campaña experimental (13 de abril de 2012), se producen las menores penetraciones máximas ($P_{MÁX}$), incluso inferiores a la obtenida en la dosificación patrón HM/AC12. Ello responde al mejor control del proceso de fabricación llevado a cabo durante ese día, corrigiendo los problemas de amasado surgidos en la 1ª fase (14 de marzo de 2012), y realizando un aporte más controlado del agua de saturación.

Los resultados de la serie fabricada con el aditivo inhibidor de agua (HRM/AC20+I) se sitúan en la gama de bajas penetraciones. Ello puede ser fruto por un lado, de lo expuesto sobre las mejoras introducidas durante la 2ª campaña de hormigonado, o bien, por otro lado, por el propio efecto positivo del inhibidor, lo cual debe seguirse en el futuro (fruto de que la campaña presentada, es escasa de resultados a este respecto).

En relación a la influencia de la incorporación de las fibras, los resultados muestran que no tiene una relevancia significativa en el comportamiento de la penetración del agua, siendo más importante el esqueleto granular o bien el proceso de fabricación, tal como se ha señalado con anterioridad.

En la Figura 6.3 se relacionan los resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión, con la porosidad (en %) y el contenido de árido reciclado (en kg/m^3). Hay que matizar que los datos de porosidad fueron obtenidos a partir de probetas moldeadas de la misma amasada, si bien no de la misma probeta (dado el carácter destructivo del ensayo de penetración de agua bajo presión).

Como era de esperar, los resultados del ensayo de penetración están relacionados con la porosidad. Así, a mayor porosidad, mayor profundidad de penetración, creciendo de manera lineal una vez la porosidad del hormigón supera un valor umbral situado entre el 10-12 %. Ello responde a que para porosidades inferiores a dicho umbral, la interconexión

entre poros es mínima, y por tanto, la penetración de agua a través del hormigón se ve dificultada.

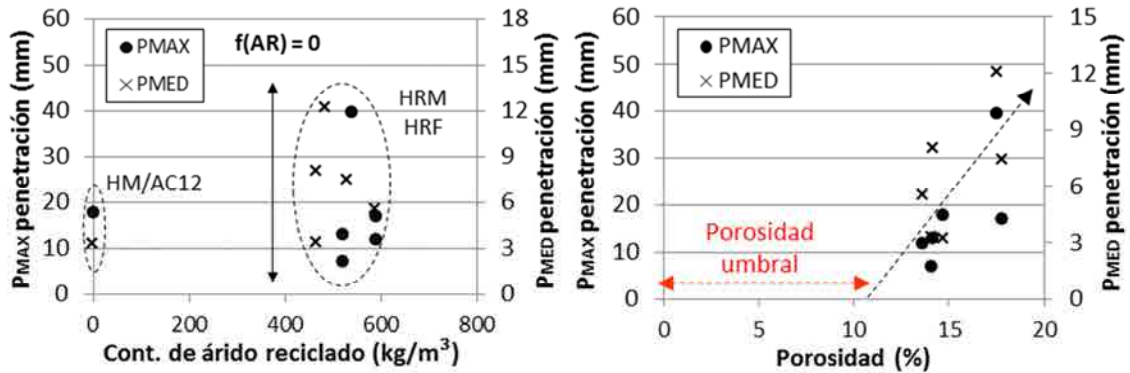


Figura 6.3. Relación entre P_{MED} y P_{MAX} con: a) Contenido de árido reciclado, b) Porosidad

El valor de porosidad umbral obtenido en la Figura 6.3a viene relacionado con el concepto de porosidad abierta del hormigón. Para ampliar el análisis, en la Figura 6.4, se presentan los valores de porosidad abierta y total, obtenidos tras realizar el ensayo UNE-EN 1936 (AENOR, 2007a) sobre las 35 muestras extraídas de los testigos TCZ (Figura 6.4a) y las 80 muestras obtenidas de los testigos TCY (Figura 6.4b), respectivamente.

Para comprobar si el uso de árido reciclado modifica en algún sentido el comportamiento obtenido, en ambas gráficas se realiza una diferenciación en función de si las muestras pertenecen a la dosificación patrón HM/AC12 (sin árido reciclado), respecto al resto de dosificaciones, independientemente de si contenga o no fibras de acero.

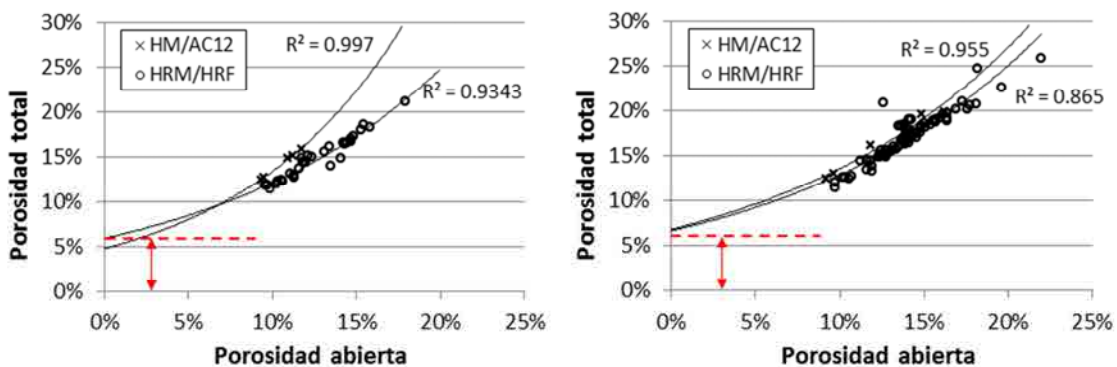


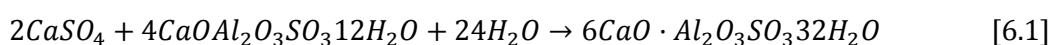
Figura 6.4. Relación entre porosidad abierta y total. a) Testigos TCZ, b) Testigos TCY

En ambos casos se confirma, independientemente de si se utilice árido reciclado, que la porosidad abierta, es decir, los poros por donde el agua puede penetrar libremente, aparece una vez la porosidad total alcanza un valor comprendido entre el 5 y el 8 %.

6.3 ENSAYO DE EXPANSIÓN POR SULFATOS INTERNOS

Con este ensayo se pretende evaluar los cambios volumétricos que pueden ocasionar los yesos presentes en los áridos reciclados mixtos, al entrar en contacto con el agua o humedad del terreno (debida al nivel freático, por ejemplo).

El yeso ($CaSO_4$), en contacto con agua (H_2O) y los monosulfatos generados durante la hidratación del cemento ($CaOAl_2O_3SO_3 \cdot 12H_2O$), reaccionan formando ettringita ($CaO \cdot Al_2O_3SO_3 \cdot 32H_2O$) (Ver ecuación 6.1). El producto de la reacción supone un aumento de volumen, respecto los componentes originales, que en caso de generarse en el hormigón endurecido, puede provocar la fisuración del hormigón.



Tal y como se expuso en el capítulo 3 (apartado 3.6.3), el ensayo consiste en registrar los cambios volumétricos producidos, al sumergir las muestras en agua destilada durante 187 días. Para ello, se toman como referencia dos puntos de medida, separados entre sí una distancia de 150 mm. Dichos puntos fueron adheridos previamente a la superficie de la probeta, para con posterioridad medir con un extensómetro mecánico (reloj comparador digital). La frecuencia de medidas utilizada es la siguiente: 0, 2, 5, 7, 14, 28, 56, 77, 91, 105, 119 y 187 días

Cabe señalar que durante la extracción de los testigos, algunos se fragmentaron por lo el número total de probetas destinadas al ensayo se redujo de las 54 originalmente previstas a 42, distribuidas de la siguiente forma: 3 de la dosificación patrón HM/AC12 y HRM/AC20, 2 de la HRM/AC12, 7 de la dosificación HRF/AC20-50, y 9 de las dosificaciones HRM/AC20+I, HRF/AC12-35a y HRF/AC12-35b.

Dado que edad de los hormigones cuando se inició el ensayo era de 27 meses, se considera que la influencia sobre los resultados obtenidos de las deformaciones debidas a la retracción del hormigón, es mínima, pudiéndose despreciar las mismas.

En la Tabla 6.3 se presentan las deformaciones máximas de expansión ($\hat{\epsilon}$) registradas durante el ensayo, para cada dosificación. Los valores medios (\bar{x}) y la desviación estándar (σ) se relacionan con el contenido total de sulfatos presentes en el hormigón, independientemente de su procedencia: sulfatos del cemento o sulfatos de los áridos reciclados 4-12-T-R y 12-20-T-R. El contenido de sulfatos se ha estimado a partir de las dosificaciones empleadas y de la proporción de éstos, sobre el peso del componente correspondiente.

Si se comparan los resultados del hormigón en masa con o sin áridos reciclados, se observa, que el incremento de volumen es algo mayor (del orden del 10 al 15% para los hormigones con áridos reciclados, como era de esperar). Por otro lado, cuando se compara los resultados de los hormigones con fibras o sin ellas se observa que las menores

expansiones máximas se obtienen con las tres dosificaciones de HRF, y oscilan entre los 0,26 y los 0,31 mm/m. Esto representa entre un 16,2 y un 29,8 % inferior a las registradas por la dosificación patrón (HM), y entre un 22,5 y un 45,8 % respecto a las dosificaciones con árido reciclado sin fibras (HRM). Ello puede poner de manifiesto la influencia de las fibras sobre el control del ancho de la microfisuras internas, debido al efecto restrictivo que éstas ejercen en el proceso de expansión.

Tipo hormigón	Dosificación	Contenido sulfatos (kg/m ³) según su procedencia:			Expansiones (mm/m)		Δê (%)
		Cemento	Árido reciclado	Total	\bar{x}	σ	
HM	HM/AC12	12,6	-	12,6	0,37	0,12	-
HRM	HRM/AC12	13,1	11	24,1	0,48	-	+29,7
	HRM/AC20	13,1	15	28,1	0,44	0,02	+18,9
	HRM/AC20+I	13,1	16	29,1	0,40	0,08	+8,1
HRF	HRF/AC12-35a	13,1	10	23,1	0,31	0,06	-16,2
	HRF/AC12-35b	13,1	9	22,1	0,28	0,06	-24,3
	HRF/AC20-50	13,1	14	27,1	0,26	0,08	-29,8

Tabla 6.3. Influencia del contenido de yeso sobre las expansiones registradas

En cuanto a la cinética de los cambios volumétricos producidos durante el ensayo, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.5. En cada una de las seis gráficas se distingue, en función de la situación de la probeta dentro del batache correspondiente, entre cota superficial (línea roja continua), intermedia (línea azul punteada) o profunda (línea verde discontinua).

Las oscilaciones en los registros (del orden de centésimas de milímetro, en términos absolutos) pueden deberse a varios factores, tales como el factor humano, cambios de temperatura, o de tolerancia del punto de medida.

En todas las muestras analizadas se observa una cinética de expansión común, independientemente de la dosificación o la localización de la probeta en el batache. Entre un 90 y un 95 % de la expansión final se experimenta durante los primeros 7 días. Este rápido aumento de volumen en primeras edades para, con posterioridad, producirse una estabilización del fenómeno, puede reflejar una cierta saturación de la muestra, lo cual es posible ya que se trabajan con probetas de pequeño tamaño (de 92 mm de diámetro).

En la Figura 6.6 se representan las expansiones máximas sufridas, en relación con el contenido estimado de sulfatos (en kg/m³), que ha sido detallado en la Tabla 6.3. El hecho de que las expansiones correspondientes a la dosificación patrón HM/AC12 (testigos 3323, 3324 y 3332), sean similares al del resto de dosificaciones, indica que los cambios volumétricos experimentados no se deben a los sulfatos presentes en los áridos reciclados, sino a otros factores.

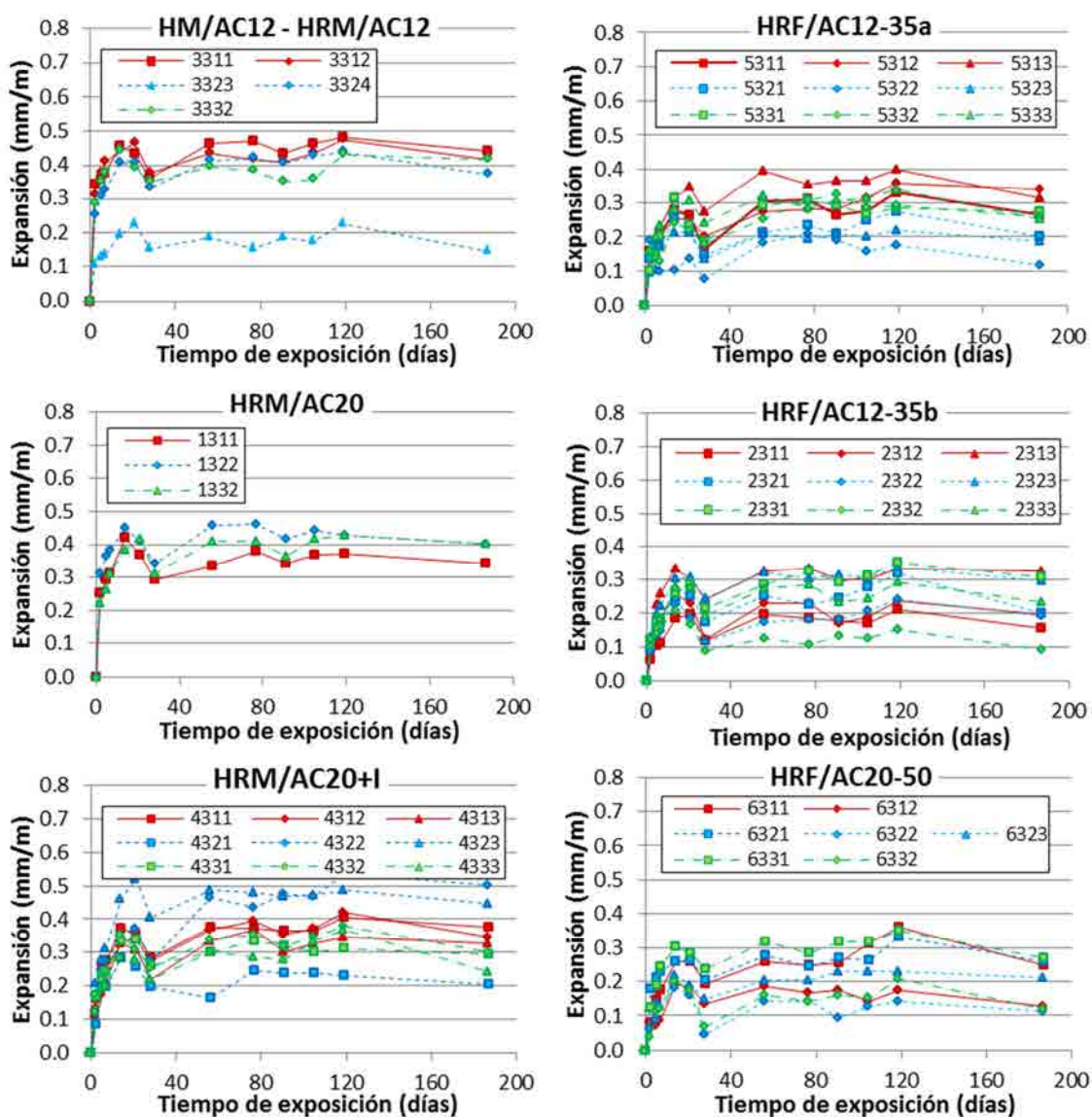


Figura 6.5. Expansiones medidas (en mm/m) por dosificación

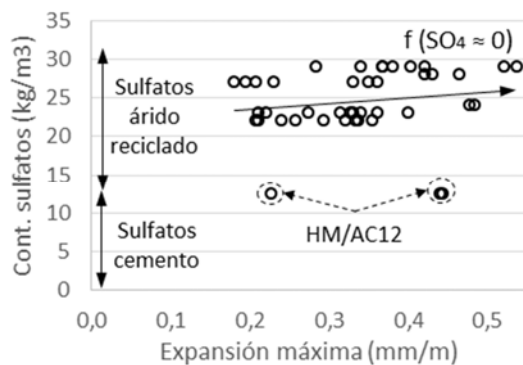


Figura 6.6. Relación entre expansión máxima (mm/m) y contenido total de sulfatos (kg/m³)

Uno de los fenómenos que puede responder al comportamiento obtenido, es el denominado **entumecimiento** del hormigón. Este proceso tiene lugar en cuando un hormigón expuesto al aire durante un periodo de tiempo elevado, con un grado de humedad bajo, se pone en contacto con el agua. También es común en estructuras con una superficie expuesta al agua y otra al ambiente, como presas, depósitos de agua o muros de contención.

La descripción dada coincide con las condiciones bajo las cuales se conservaron las muestras ensayadas. Cabe recordar que éstas se almacenaron, debidamente protegidas, en condiciones ambientales durante un periodo de tiempo cercano a los 20 meses, desde su obtención (noviembre de 2012) hasta el inicio del ensayo (julio de 2014).

La magnitud de la expansión producida por entumecimiento del hormigón, depende de múltiples factores, como el tipo de cemento, la naturaleza y la granulometría del árido o la relación agua/cemento, entre otros. La ley que rige éstas expansiones, en función del tiempo es de tipo logarítmico, siguiendo la ecuación logarítmica [6.2] (Fernández Cánovas, 1980).

$$\gamma = k \cdot \log t \quad [6.2]$$

Con γ : expansión lineal, en mm/m
 k: constante de entumecimiento
 t: tiempo de exposición en agua, en días

En la citada referencia, la expansión por entumecimiento experimentada por hormigones con 350 kg/m³ de cemento portland, y árido grueso natural de tamaño máximo 20 mm, tras 400 días de inmersión, oscila entre los 0,16 y los 0,23 mm/m, dependiendo del tipo de las adiciones utilizadas, pudiendo alcanzar valores de entre 1,1 y 2,4 mm/m, en caso de que las muestras hayan sido desecadas al horno a 100°C. Ello supone un valor de la constante k comprendido entre 0,061 y 0,088 en las muestras sin desecar, y de entre 0,42 y 0,92 en las muestras desecadas.

En la Tabla 6.4 se muestran los valores de la constante de entumecimiento (k), obtenidos para cada dosificación. Éstas se han calculado, tomando como referencia las expansiones máximas medias registradas en el ensayo en cada caso (detalladas en la Tabla 6.3), y un tiempo de exposición de 187 días. El rango de k obtenido (entre 0,11 y 0,21), es prácticamente idéntico al registrado por Fernández Cánovas (1980). Ello confirma que el uso de los áridos reciclados 4/12-T-R y 12/20-T-R, no ha alterado el comportamiento deformacional del hormigón. En este sentido, y considerando las dimensiones habituales de las estructuras de cimentación, el análisis de las deformaciones registradas en el ensayo permite confirmar que el uso de áridos reciclados mixtos parece ser compatible con su uso a nivel estructural.

Tipo hormigón	Dosificación	Batache	Expansiones (mm/m)		k
			\bar{x}	σ	
HM	HM/AC12	# 3A	0,37	0,12	0,16
HRM	HRM/AC12	# 3B	0,48	-	0,21
	HRM/AC20	#1	0,44	0,02	0,19
	HRM/AC20+I	# 4	0,40	0,08	0,18
HRF	HRF/AC12-35a	# 5	0,31	0,06	0,14
	HRF/AC12-35b	# 2	0,28	0,06	0,12
	HRF/AC20-50	# 6	0,26	0,08	0,11

Tabla 6.4. Valor de la constante k de entumecimiento, según dosificación

6.4 ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS

Este ensayo pretende analizar la resistencia a la penetración de cloruros de los hormigones con árido reciclado. Para ello, se han sumergido durante un periodo de 205 días en una solución de cloruros (concentración de 165 g/l de NaCl), un total de 51 muestras cilíndricas de 92 mm de diámetro. Estas probetas fueron obtenidas a partir de la fragmentación de los testigos cilíndricos TCY, siguiendo el esquema dado en la Figura 6.1.

Tal y como se describió en el capítulo 3, antes de iniciar el ensayo, a cada una de las muestras le fue aplicado una capa protectora de resina epoxy a su alrededor, de forma que únicamente la cara superior de la probeta, que previamente había sido pulimentada, se viera expuesta a la solución de agua con cloruros.

El método empleado para determinar el frente de penetración consiste en aplicar una solución 0,1M de nitrato de plata (AgNO_3) sobre las dos caras de la probeta, una vez ésta ha sido fragmentada diametralmente en seco, mediante ensayo brasileño. El avance de los cloruros queda determinado por la diferente tonalidad que adopta el hormigón en función la reacción entre el AgNO_3 y los cloruros. Dicha tonalidad depende de múltiples factores como la naturaleza del cemento o las adiciones utilizadas (Yuan *et al.*, 2008). En todo caso, la zona afectada por cloruros queda definida por una tonalidad más clara (blanco plateado), mientras que la zona libre de éstos permanece marrón oscuro.

Para identificar con mayor facilidad el frente de penetración, ha sido necesario aplicar un filtro sobre todas las fotografías tomadas, a fin de realzar el contraste entre tonalidades (Figura 6.7a y Figura 6.7b). Para ello, se ha empleado el programa de software GIMP GNU Image Manipulation Program. La evaluación del frente de penetración, se ha realizado a intervalos de 10 mm, de acuerdo con las recomendaciones dadas por la normativa NT Build 492 (NORDTEST, 1999), por medio de la herramienta de CAD (Figura 6.7c).

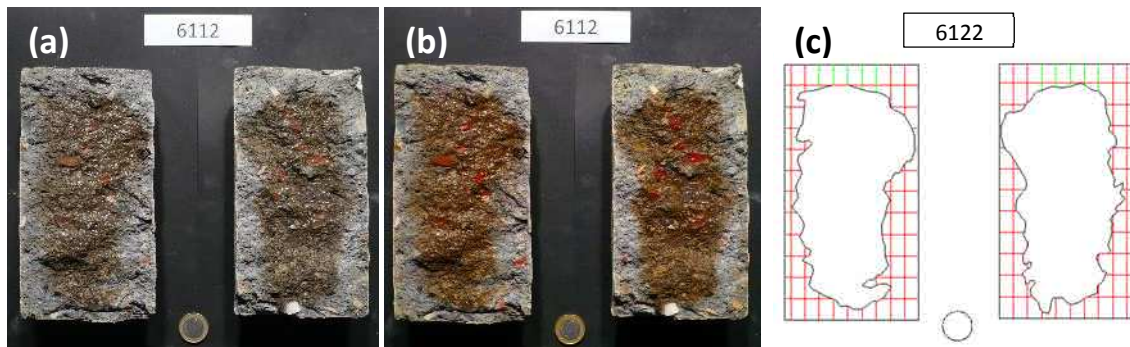


Figura 6.7. Tratamiento imágenes. a) original, b) Realce contraste, c) Evaluación del frente

Al evaluar los frentes de penetración, se observa que el pretratamiento aplicado no ha impermeabilizado, en ningún caso, la superficie lateral de las muestras (tal y como muestra la Figura 6.7). Dado que no puede asegurarse que el flujo de cloruros a través de la capa de resina se ha realizado de forma totalmente libre, únicamente se consideran válidas las lecturas tomadas desde la cara superior, excluyendo aquellas que han sido alteradas por la penetración lateral de cloruros. Este inconveniente, reduce el número de lecturas válidas por muestra, desde las 8 – 9 previstas inicialmente, hasta apenas 2 o 3, en los casos más desfavorables.

En la Tabla 6.5 se presentan las profundidades de frente de penetración (X_d) respecto a la superficie superior de la probeta. Cada uno de los valores de la tabla representa la media de las lecturas válidas correspondientes a las dos caras de la muestra. La determinación del frente de penetración se ha evaluado a tres edades distintas: 18 probetas a 62 días (T_{62}), 18 probetas a 95 días (T_{95}) y 15 probetas a 205 días (T_{205}). Además, los resultados se agrupan en función de la cota del batache a la que pertenece la muestra analizada, diferenciando entre la zona superficial, intermedia y profunda. Las fotografías a partir de las cuales se han determinado los valores dados, así como lecturas realizadas de las profundidades de penetración vienen adjuntas en el ANEJO D.

Tipo hormigón	Dosificación	Z superficial			Z intermedia			Z profunda		
		T_{62}	T_{95}	T_{205}	T_{62}	T_{95}	T_{205}	T_{62}	T_{95}	T_{205}
HM	HM/AC12	-	-	-	44,8	52,7	32,9	33,2	35,1	20,5
HRM	HRM/AC12	39,5	35,6	34,1	-	-	-	-	-	-
	HRM/AC20	30,0	39,0	*	26,7	31,7	*	24,5	23,1	> 46
	HRM/AC20+I	19,1	23,7	28,6	17,6	20,5	29,3	19,8	20,7	30,5
HRF	HRF/AC12-35a	44,4	34,8	*	34,0	37,2	36,5	39,5	39,6	42,2
	HRF/AC12-35b	32,7	21,1	38,5	12,5	21,1	30,6	27,5	23,5	35,9
	HRF/AC20-50	13,2	16,5	26,2	15,1	18,7	22,3	15,6	18,6	30,4

* Éstas muestras no pudieron analizarse por la fragmentación excesiva que sufrieron los testigos TCY durante su proceso de obtención

Tabla 6.5. Frentes de penetración (X_d) obtenidos para los tiempos de exposición de: 62 días (T_{62}), 95 días (T_{95}) y 205 días (T_{205})

Al comparar los resultados de los testigos de hormigón en masa con o sin árido reciclado, si bien el número de muestras de estos es pequeño, se observa unos valores superiores de penetración de cloruros en los testigos de hormigones con áridos naturales (HM/AC12). Aunque no hay una explicación clara a este resultado, puede responder a una cierta reacción de los áridos reciclados con los cloruros, ralentizando su avance

Con respecto a la incorporación de la fibra, los resultados no reflejan influencia alguna, en definitiva, no son determinantes. La fibra puede considerarse como un árido grueso de bajo coeficiente de forma, que si se tiene en cuenta en la dosificación (como así ha sido), no tiene porqué influir en la durabilidad del hormigón, consiguiendo hormigones compactos y cerrados. En esta línea puede verse que las menores penetraciones se producen en las muestras pertenecientes a la dosificación HRF/AC20-50, con árido reciclado y fibras de acero de 50 mm. Los valores obtenidos (entre 13 y 16 mm a los 62 días, entre 16 y 19 mm a los 95 días, y entre 22 y 30 mm a los 205 días), son los más bajos entre todas las dosificaciones analizadas, y muy inferiores a los registrados con las muestras de la dosificación patrón HM/AC12.

Otro aspecto positivo a considerar es la baja dispersión de los resultados correspondientes a las dosificaciones HRF/AC20-50 y HRM/AC20+I (y en menor medida de la HRF/AC12-35b) en función de la cota del batache. Ello demuestra la homogeneidad de los tres hormigones fabricados durante la 2ª fase de la 1ª campaña experimental, demostrando un buen proceso de fabricación, independientemente del tratamiento de saturación empleado (agua de saturación o aditivo hidrófugo) o de la adición de fibras de acero.

Por el contrario, los resultados obtenidos de las dosificaciones HM/AC12 (patrón), HRM/AC12, HRM/AC20 y HRF/AC12-35a, presentan una elevada dispersión, tanto si consideramos como variable la zona del batache a la que pertenecen (superficial, intermedia y profunda), como el tiempo de exposición. En este sentido, se observan algunos resultados anómalos, tales como la obtención de valores de X_d inferiores para tiempos de exposición mayores. Si bien no es posible asegurar la causa de esta circunstancia, puede deberse a un hormigón heterogéneo o a la presencia de microfisuras en las muestras (a través de las cuales penetran con mayor facilidad los cloruros), producidas durante su proceso de extracción del batache.

Por tanto puede afirmarse, que los resultados presentados en la Tabla 6.5 vienen condicionados por la calidad del proceso de fabricación, y no del uso del árido reciclado. En este sentido, del mismo modo a como ha sucedido con el ensayo de penetración de agua bajo presión (analizado anteriormente en el apartado 6.2), las menores penetraciones (X_d) coinciden con las tres dosificaciones fabricadas durante la 2ª fase de la 1ª campaña experimental: HRM/AC20+I, HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50. En cambio, las dosificaciones HRM/AC12, HRM/AC20 y HRF/AC12-35a, que presentaron ciertos problemas relacionados con el contenido de agua de saturación de los áridos reciclados, sufren penetraciones de hasta un 100 % superior, para un mismo tiempo de exposición.

En la Figura 6.7 se relaciona los resultados obtenidos del ensayo de penetración de agua bajo presión (P_{MED} y P_{MAX}), con los del ensayo de penetración de cloruros. En los tres casos analizados (dosificaciones HRF/AC20, HRF/AC12-35b y HRM/AC0+I) los resultados obtenidos en los dos ensayos realizados están directamente relacionados, en línea con lo expuesto por Beltrán *et al.* (2014), si bien el mecanismo físico que rige el comportamiento en cada uno de ellos es distinto. Concretamente, el mecanismo de transporte de los cloruros durante el ensayo puede describirse por la 2ª Ley de Fick, cuya expresión analítica se detalla en la expresión [6.3]

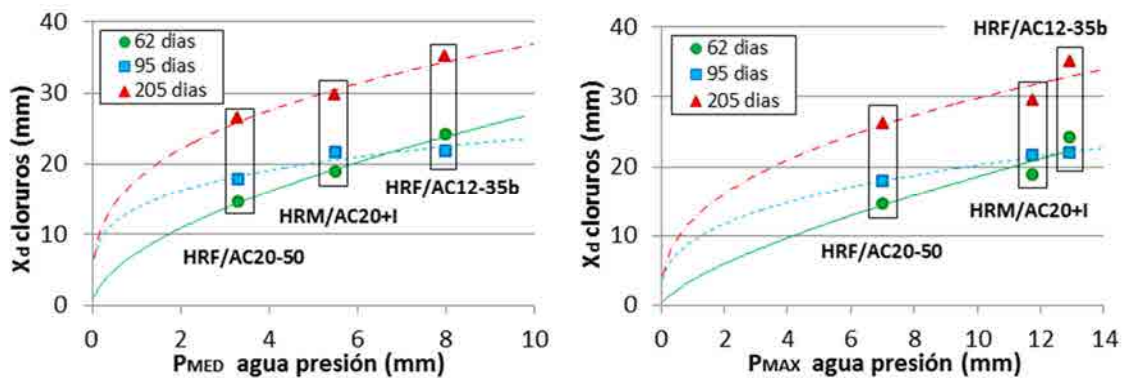


Figura 6.8. Relación entre X_d (ensayo de penetración cloruros), con:
a) P_{MED} , b) P_{MAX} (ensayo de penetración de agua bajo presión)

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}}\right) \rightarrow D_e = \left(\frac{x_d}{2 \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_d}{C_s}\right) \cdot \sqrt{t}}\right)^2 \quad [6.3]$$

con: $C(x, t)$: concentración de cloruros, medido a la profundidad x , para un tiempo de exposición t , (en % masa)

C_s : concentración de cloruros en la superficie de contorno, (en % masa)

C_i : concentración inicial de cloruros en el hormigón = 0

x_d : distancia desde la superficie (en metros)

D_e : coeficiente efectivo de difusión de cloruros (en metros²/s)

t : tiempo de exposición (en s)

erf : función de error, definida según [6.4]

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z \exp(-u^2) du \quad [6.4]$$

El método de obtención del frente de penetración empleando nitrato de plata detecta únicamente el contenido de cloruros libres, que son los que realmente pueden reaccionar y atacar al refuerzo de acero (Baroghel-Bouny *et al.*, 2007). Por lo que otro de los aspectos a considerar en el análisis, es la concentración umbral de cloruros que

provoca el cambio de tonalidad en el hormigón. En este sentido se han realizado numerosos estudios, tales como Otsuki *et al.* (1992), Collepardi (1995) o Andrade *et al.* (1999), con resultados muy dispares, ya que establecen el umbral de cloruros libres en el rango comprendido entre el 0,01 y el 1,69 % sobre el peso de cemento (0,071 – 0,714 mol/l). Según la bibliografía especializada se adopta como valor de cálculo un valor para $C_d/C_s = 0,14$ (He *et al.*, 2012).

En la Tabla 6.5 se presentan los valores del coeficiente de difusión obtenidos, en distintas cotas de los testigos, a partir de aplicar la expresión [6.3] sobre los resultados obtenidos durante el ensayo. Asimismo, en la última columna se da el valor medio (del obtenido a diferentes cotas) representativo del tipo de hormigón.

Tipo hormigón	Dosificación	Z superficial	Z intermedia	Z profunda	Total
HM	HM/AC12	-	6,45E-11	3,16E-11	4,81E-11
HRM	HRM/AC12	4,26E-11	-	-	4,26E-11
	HRM/AC20	4,42E-11	3,19E-11	*	3,27E-11
	HRM/AC20+I	1,52E-11	1,31E-11	1,48E-11	1,44E-11
HRF	HRF/AC12-35a	6,44E-11	3,83E-11	4,86E-11	4,87E-11
	HRF/AC12-35b	2,81E-11	1,14E-11	2,34E-11	2,10E-11
	HRF/AC20-50	0,87E-11	0,94E-11	1,16E-11	0,99E-11

Tabla 6.6. Coeficientes de difusión D (m^2/s), en función de la dosificación y cota del batache

Los coeficientes obtenidos se sitúan dentro del rango habitualmente adoptado para hormigones convencionales (10^{-10} a 10^{-13} m^2/s) (Costa y Appleton, 1999; Bermúdez *et al.*, 2008), y son prácticamente idénticos a los resultados presentados por Vázquez *et al.* (2014). En dicho estudio, se han obtenido coeficientes de difusión comprendidos entre $2,91 \cdot 10^{-11}$ y $2,25 \cdot 10^{-11}$ m^2/s en hormigones fabricados con un 100% de árido reciclado y una relación agua/cemento de 0,45. Hay que tener presente que tanto en la investigación citada, como en la actual, los áridos reciclados provienen del mismo origen (empresa Gestora de Runes).

6.5 CONCLUSIONES

En base a los resultados de los tres ensayos llevados a cabo para evaluar la durabilidad de los hormigones desarrollados, se puede poner de manifiesto que el uso de árido reciclados conduce a hormigones de durabilidad equivalente (o adecuada) a la aceptada para los hormigones convencionales.

- En los ensayos realizados, la durabilidad viene condicionada en mayor grado por el proceso de fabricación que por la utilización de áridos reciclados. En este sentido, las menores profundidades de penetración de agua y cloruros, corresponden a las

dosificaciones HRM/AC20+I, HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50, fabricadas durante la 2ª fase de la campaña experimental, donde el proceso de saturación de los áridos reciclados se realizó de forma adecuada.

- Los valores de penetración de agua a presión, obtenidos del ensayo UNE-EN 12390-8 están dentro de los rangos establecidos por la instrucción EHE-08, tratándose por tanto de un material válido para hacer frente a los agentes/ambientes en los que hay presencia de cloruros y/o sulfatos.
- Las expansiones registradas durante el ensayo de reacción sulfática interna, situadas en el rango comprendido entre 0,1 y 0,5 mm/m, se deben al entumecimiento del hormigón y no al yeso presente en el árido reciclado.
- Los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos ($1 \cdot 10^{-11}$ a $5 \cdot 10^{-11}$ m²/s), son similares a los obtenidos por otros autores, y se sitúan en el rango habitual de los hormigones convencionales.

CAPÍTULO 7

APLICACIÓN INDUSTRIAL DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO

7.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores (4, 5 y 6) se ha confirmado, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, la viabilidad técnica del empleo de un hormigón con árido reciclado para usos estructurales, concretamente en elementos de cimentación ejecutados *in situ*, tales como los batches realizados en la prueba piloto.

Para completar el estudio desarrollado en esta Tesis Doctoral, el presente capítulo tiene **dos objetivos**. Por un lado, contrastar la viabilidad de uso del hormigón para elementos prefabricados (completando la experiencia *in situ*), y por otro, sentar las bases de cálculo para generalizar su uso.

En consecuencia, el capítulo se estructura en dos partes bien diferenciadas. En primer lugar (apartado 7.2), en el contexto de relación del doctorado industrial realizado bajo el amparo de la empresa **ESCOFET 1886, S.A**, se aplica la metodología desarrollada previamente en las campañas experimentales dentro de un proceso industrializado. Concretamente, para la fabricación de un banco prefabricado de hormigón, con un 100% de su fracción gruesa compuesta por árido reciclado de hormigón.

La segunda parte del capítulo, pretende ser un elemento de ayuda a los técnicos usuarios de la instrucción EHE-08 que quieran hacer una aproximación al tipo de hormigones con los que se ha trabajado en la tesis. Las recomendaciones dadas, relativas a

nivel de proyecto (apartado 7.3), fabricación (apartado 7.4) y puesta en obra (apartado 7.5), pueden servir como base de partida para unos ajustes en la Instrucción EHE-08 vigente en la actualidad.

7.2 IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL

Con el fin de cumplir el primero de los objetivos planteados, y demostrar la simplicidad de incorporar los áridos reciclados en el proceso, se llevó a cabo una experiencia el día 27 de noviembre de 2014, en las instalaciones de la empresa ESCOFET 1886 en Martorell (Barcelona), S.A. En esta, se realizó una amasada de 0,5 m³, con la que se fabricó la pieza de mobiliario urbano denominada BANCO MODULAR CONCAVO. Éste se encuentra presente en el catálogo de la empresa desde el año 1979 y fue diseñada por los arquitectos Josep Llusçà y Ramón Benedito. Las especificaciones técnicas de la misma se adjuntan en el ANEJO E.

Aparte de los aspectos técnicos, durante la prueba se han tenido en cuenta aspectos de tiempos y costes de producción, cara a evaluar la viabilidad real de su implantación industrial. Hay que tener presente que la mayor absorción de los áridos reciclados respecto los áridos convencionales, hace necesario modificar el proceso de fabricación del hormigón, requiriendo un tratamiento de pre-saturación.

A nivel industrial, este hecho introduce un aspecto negativo, pues se incrementa el tiempo de fabricación. Por el contrario, esta demora queda totalmente compensada si se considera el proceso en su totalidad, desde su fabricación hasta su puesta (ya sea en obra o en moldes prefabricados), en virtud de la autocompactabilidad del hormigón y la sustitución de la armadura por fibras de acero, logrando reducir los tiempos de ejecución.

7.2.1 Materiales empleados

El **cemento** utilizado ha sido un CEM I 52,5R, compuesto al 98 % por clínker, y una superficie Blaine de 3600 cm²/g. Este cemento da respuesta a las demandas básicas en la industria del prefabricado, desarrollando resistencias suficientemente elevadas a edades tempranas, permitiendo desenconfrar y manipular el elemento fabricado a las pocas horas de su ejecución. Por último, el contenido de sulfatos (SO₄) y cloruros (Cl⁻) obtenidos del análisis químico es del 3,4 y del 0,04 %, respectivamente.

Se han utilizado cuatro tipos de áridos: tres naturales (polvo de mármol 500 µm; arena Canro 0-3 mm y Berroq 2,5-6 mm), y un árido reciclado de hormigón, de granulometría 6-12 mm. Se ha limitado a este tamaño máximo, para favorecer la autocompactabilidad del hormigón, de acuerdo con las recomendaciones dadas en el anejo 17 de la Instrucción española EHE-08. Las curvas granulométricas de dichos áridos, obtenidas según la norma UNE-EN 933-2 (AENOR, 1996a) se presentan en la Figura 7.1.

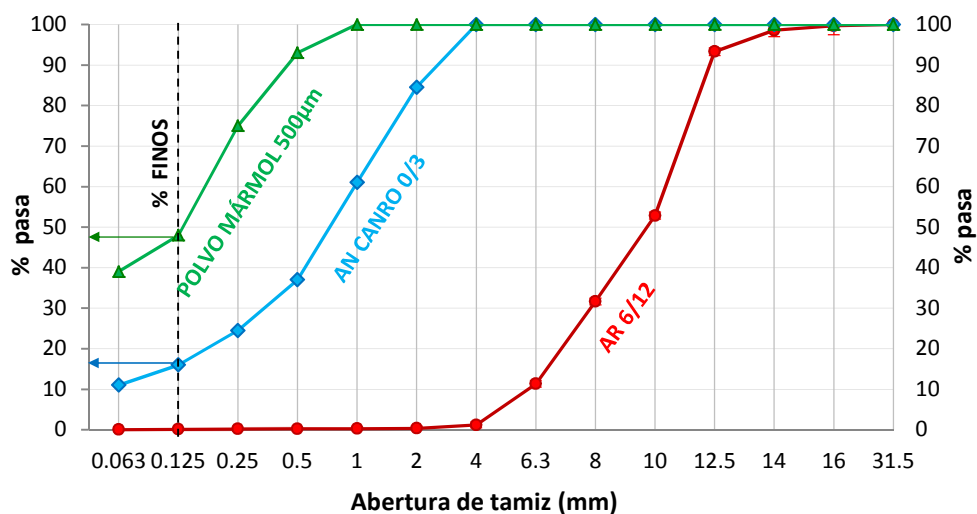


Figura 7.1 Curvas granulométricas de los áridos utilizados.

Cada uno de los tres áridos analizados ocupa un rango de tamaños propio, sin prácticamente solapamientos entre ellos. La fracción gruesa del esqueleto granular viene constituida exclusivamente por el árido reciclado 6/12; la fracción intermedia por el árido natural Berroq 2,5/6, mientras que los finos vienen aportados por el AN 0/3 y el polvo de mármol, los cuales representan un 15 y un 48 % del total de árido, respectivamente. Esta combinación de áridos, no usual en elementos de hormigón *in situ*, se corresponde a piezas de hormigón con alto valor estético.

Para facilitar la autocompactabilidad de la mezcla, se ha empleado el **aditivo superplastificante** de alta actividad basado en policarboxilatos, GLENIUM ACE 425, suministrado por la empresa BASF *Construction Chemicals España, S.L.* Las especificaciones técnicas del conjunto de materiales empleados se adjuntan en el ANEJO E.

7.2.2 Caracterización del árido reciclado

El árido reciclado utilizado, procedente de la empresa *Germans Cañet Xirgu S.L.*, y denominado 6/12-T-C, fue caracterizado previamente en el LTE Luís Agulló, con el fin de determinar sus propiedades físicas, tales como la granulometría, composición, densidad y absorción. Las normas empleadas para ello, han sido la UNE-EN 1097-6 (AENOR, 2001), la UNE-EN 1097-3 (AENOR, 1999) y la UNE-EN 933-11 (AENOR, 2009a), respectivamente. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 7.1.

El árido con mortero adherido es el componente mayoritario, representando el 67,1 % del total de la muestra, mientras que el árido limpio supone un 26,8 %. La presencia del resto de componentes (material bituminoso y cerámica) apenas supone un 6,1 %. Según la clasificación propuesta por el Proyecto GEAR (GERD, 2012), el árido reciclado analizado se cataloga como **árido reciclado de hormigón (ARH)**.

Densidad (g/cm ³)		Absorción 24h (%)	Composición (%)			
Aparente	Real		Árido con mortero	Árido sin mortero	Cerámica	Material bituminoso
2,67	2,35	6,48	67,14	26,76	1,08	5,01

Tabla 7.1. Propiedades físicas del árido reciclado 6/12-T-R



Figura 7.2. Árido reciclado. a) Vista general, b) Detalle, c) Clasificación de componentes

La absorción a las 24 horas es del 6,48 %, sin rebasar el límite del 7 % actualmente impuesto por la instrucción española EHE-08. Para evitar que esta característica propia de los áridos reciclados incida durante el proceso de fabricación, es necesario realizar una presaturación de los áridos. Entre los dos tratamientos empleados durante las campañas experimentales realizadas previamente (expuestos en el capítulo 3), se ha optado por el método de presaturación con agua, dada su simplicidad.

La densidad del árido reciclado es de 2,35 g/cm³, valor que equivale a una reducción de entre el 10 y el 12 % respecto las densidades habituales de áridos naturales. La densidad obtenida viene directamente relacionada con la composición del árido, siendo mayor cuanto mayor sea el porcentaje de los componentes más densos, como el árido con o sin mortero adherido. Por el contrario, cuanto mayor sea el contenido de material cerámico o bituminoso, menor será la densidad del árido reciclado.

La afirmación anterior puede justificarse con la Tabla 7.2, donde se realiza una estimación de la densidad del árido reciclado a partir de la densidad de cada uno de los materiales que lo componen, y de la composición del árido (mostrada en la Tabla 7.1), aplicando la expresión [7.4]. La diferencia entre la densidad estimada (2,38 g/cm³) y la obtenida experimentalmente con el ensayo UNE-EN 1097-6 (2,35 g/cm³), es del 1,27 %.

$$\rho_{AR} = \sum_i \rho_i \cdot c_i \quad [7.4]$$

donde: ρ_{AR} : Densidad del árido reciclado (en g/cm³)

ρ_i : Densidad del componente "i", presente en el árido reciclado (en g/cm³)

c_i : % del componente "i" en la composición del árido (ver Tabla 7.1)

Material	Componente	Dens. componente (g/cm ³)	Composición (%)	Dens. árido (g/cm ³)	
				Estimada ¹	Real
Árido reciclado 6/12-T-R	Árido con mortero	2,30	67,14	2,38	2,35
	Árido sin mortero	2,65	26,76		
	Mat. Cerámico	2,00	1,08		
	Mat. Bituminoso	2,10	5,01		

Tabla 7.2. Densidad estimada del árido reciclado 6/12-T-R, a partir de su composición

7.2.3 Dosificación

Tomando como referencia las dosificaciones habitualmente empleadas en la industria del prefabricado, la dosificación propuesta (Tabla 7.3) se obtuvo tras realizar pequeñas modificaciones sobre éstas, con el fin de adaptarla al empleo de árido reciclado.

Material	Contenido (en kg/m ³)
Cemento gris CEM I 52,5R	400
Polvo de mármol 500µm	260
Arena Canro 0-3	500
Berroq 2,5-6	400
6/12-T-R	520
Glenium B255	16
Agua libre	180 + 4
Agua de saturación	20

Tabla 7.3. Dosificación utilizada durante la prueba

Dado que el contenido de finos debe situarse entre los 450 y los 600 kg/m³ (Skarendahl y Petersson, 2000), y en base a la granulometría de los áridos empleados mostrada en la Figura 7.1, se fija en 400 kg/m³ el contenido de cemento, 260 kg/m³ de polvo de mármol, de los cuales un 48 % son finos y 500 kg/m³ de arena 0-3, de los que un 15% son finos. El esqueleto granular se completa con 400 kg/m³ del árido natural Berroq 2,5/6 y 520 kg/m³ del árido reciclado 6/12-T-R. Con esta composición, el contenido de finos se sitúa en los **600 kg/m³**.

$$\text{Cont. de finos } (\varnothing < 0,125\text{mm}) = [\text{Cemento}] + [\text{Finos árido}]$$

$$\text{Cont. de finos } (\varnothing < 0,125\text{mm}) = 400 + (0,48 \cdot 260 + 0,15 \cdot 500) \sim \mathbf{600 \frac{kg}{m^3}}$$

Nótese que dos terceras partes de los finos aportados (400 kg/m^3), proceden del cemento CEM I 52,5R. El sector del prefabricado suele optar por hormigones con elevados contenidos de cemento, pues eso permite satisfacer dos de los requisitos necesarios que se persiguen: autocompactabilidad y resistencias elevadas a edades tempranas.

El agua total aportada (204 l/m^3) se divide en función de su finalidad. En primer lugar se añaden 20 l/m^3 a fin de presaturar los 520 kg/m^3 de árido reciclado; y finalmente, 184 l/m^3 de agua libre para hidratar el cemento. Ello representa una relación agua/cemento total y efectiva de 0,51 y 0,46, respectivamente. Por último, se aportaron 16 l/m^3 del superplastificante Glenium ACE 425, lo que representa un 4 % del total sobre peso de cemento.

7.2.4 Proceso de amasado y puesta en molde

La fabricación del hormigón tuvo lugar en las instalaciones de la empresa ESCOFET 1886, S.A, situada en el polígono industrial La Torre, en Martorell (Barcelona). Los áridos naturales utilizados se almacenaban en silos, (Figura 7.3a), mientras que el árido reciclado se encontraba en sacos de 1000 kg, protegidos bajo cubierta.

El proceso de amasado se inició con la pre-saturación de los áridos reciclados en la planta dosificadora (Figura 7.2b). El contenido de agua de saturación se calculó en función de tres variables: la absorción a 24 horas obtenidos durante su caracterización (Tabla 7.1), el factor de corrección $f = 0,80$ (IHOBE, 2011), que relaciona la capacidad de absorción de agua en 10 minutos respecto la de 24 horas, y la humedad relativa presente en los áridos, que se estimó, en base a las condiciones ambientales y de acopio, entre el 1,5 y el 2,0 %. Con estos datos, tal y como se justifica a continuación, se añadieron 20 l/m^3 de agua de saturación.

$$\text{Agua de saturación (\% s. p. AR)} = (WA_{24h} - h) \cdot f = (6,48 - 1,5) \cdot 0,8 = 4,0\%$$

$$\text{Agua de saturación (total)} = 0,04 \cdot [\text{Cont. AR}] = 0,04 \cdot 520 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \sim 20 \frac{\text{l}}{\text{m}^3}$$

Una vez saturados los áridos reciclados, se introducen el resto de componentes del esqueleto granular, empezando por la fracción gruesa y finalizando con el cemento y el polvo de mármol. Por último, se aporta el agua de hidratación (180 l/m^3) y el aditivo superplastificante.

En base al aspecto visual observado tras el proceso de mezcla durante 3 minutos, se estimó conveniente aportar 4 l/m^3 adicionales de agua a fin de mejorar la fluidez del hormigón. Tras otro amasado de 1 minuto de duración se dio por finalizado el proceso, obteniendo el hormigón de consistencia autocompactante, como el mostrado en la Figura 7.3c.



Figura 7.3. a) Silos de áridos, b) Planta dosificadora, c) Aspecto del hormigón tras amasado

Por último, con ayuda de un puente grúa, el hormigón se vertió sobre el molde metálico correspondiente (Figura 7.4a), tal y como se muestra en la Figura 7.4 (b-c). Para completar la prueba se moldearon seis probetas, tres cilíndricas 150 x 300 mm y tres prismáticas 100 x 100 x 400 mm, para determinar la resistencia a compresión y flexión del hormigón fabricado a los 28 días de edad.



Figura 7.4. a) Molde metálico, b y c) Proceso de vertido del hormigón

7.2.5 Resultados obtenidos

Trascurridos dos días desde el hormigonado, y una vez el material ha alcanzado la resistencia suficiente, se procede al desmoldeo de la pieza (Figura 7.5). El aspecto exterior es el adecuado, sin imperfecciones superficiales, por lo que la consistencia obtenida fue la necesaria para rellenar completamente el molde. Desde el punto de vista estético (muy importante en piezas de mobiliario urbano), la utilización del árido reciclado grueso aporta un valor añadido a la pieza, pues le confiere un contraste cromático muy amplio: desde el gris habitual, el negro (debido al material bituminoso) o el anaranjado (debido al material cerámico).

Los resultados obtenidos de la resistencia a compresión en probetas cilíndricas a 7 días y 28 días fueron de 39,8 MPa y 45,5 MPa, respectivamente; mientras que los resultados de la resistencia a flexotracción en probetas prismática a 7 días y 28 días fueron de 4,6 MPa y 6,2 MPa.

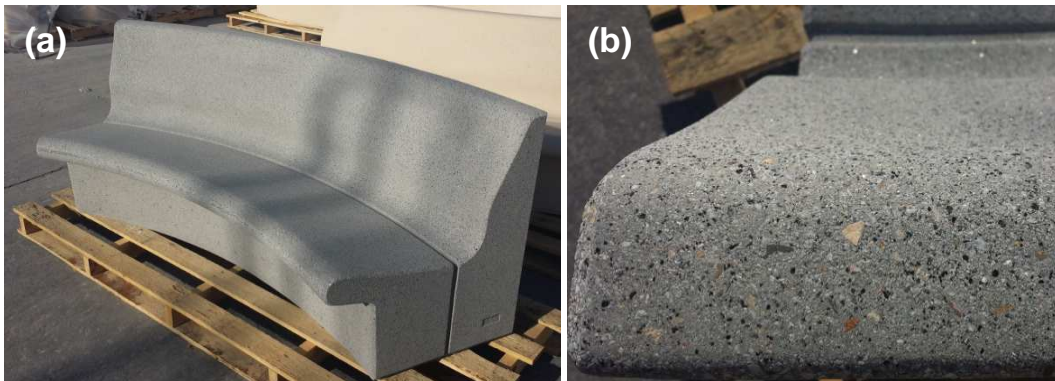


Figura 7.5. Producto acabado. a) Vista general, b) Detalle

Las resistencias obtenidas permiten afirmar que la utilización del árido reciclado no supone un inconveniente en este tipo de aplicaciones, superando ampliamente los requisitos habitualmente demandados. La resistencia a compresión a 7 días (~ 40 MPa) representa un 87,6 % de las obtenidas a 28 días, gracias a la utilización de un cemento de endurecimiento rápido.

7.3 RECOMENDACIONES DE PROYECTO

7.3.1 Ámbito de aplicación

Se recomienda ampliar la definición de hormigón reciclado (HR), a todos aquellos hormigones fabricados con árido grueso reciclado, independientemente de si proceden del machaqueo de hormigón (definición actual) o mixto.

Para su aplicación en hormigón estructural, se recomienda no imponer *a priori* una restricción relativa al porcentaje máximo de sustitución de la fracción gruesa (actualmente del 20 %). Los resultados obtenidos en esta tesis, demuestran la viabilidad técnica de emplear, con totales garantías, una sustitución de hasta el 100 %.

El árido reciclado puede emplearse en hormigones en masa, armados o reforzados con fibras de acero, de resistencias características no superiores a 45 MPa. Una mayor resistencia requiere de contenidos de cemento superiores a los 370 kg/m^3 utilizados en las campañas experimentales.

7.3.2 Modificación de formulaciones

En este apartado se proponen diversas correcciones a introducir en los parámetros mecánicos y físicos principales de proyecto (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, densidad) en caso de utilizar áridos reciclados. En base a las experiencias realizadas, el hormigón con árido reciclado mixto puede ser empleado con totales

garantías, en proyectos que requieran de un material de **resistencia a compresión moderada**, entre **30 y 45 MPa**. Por el contrario, se desaconseja su utilización en proyectos con requerimientos de resistencia superiores (> 50 MPa), o en aquellos donde se impongan limitaciones relacionadas con flechas máximas, como puentes o pasarelas.

En cuanto al módulo de elasticidad, se ha visto que la utilización de áridos reciclados reduce su valor, respecto un hormigón convencional, fruto de la mayor porosidad y la mayor deformabilidad de los áridos. Actualmente, la relación $f_c - E$ que propone la instrucción EHE-08 para hormigones convencionales sigue una expresión tipo [7.1] (empleando una raíz cúbica). Sin embargo, para hormigones con áridos reciclados de resistencia comprendida, en el rango recomendado, la relación $f_c - E$ que mejor ajusta el comportamiento es una expresión tipo [7.2], (empleando una raíz cuadrada).

$$E_{cm} = 8500 \cdot \alpha_{AR} \cdot \sqrt[3]{f_c} = 8500 \cdot (1 - 0.000216 \cdot AR) \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad [7.1]$$

$$E_{cm} = 4700 \cdot \alpha_{AR} \cdot \sqrt{f_c} = 4700 \cdot (1 - 0.000268 \cdot AR) \cdot \sqrt{f_c} \quad [7.2]$$

donde: E_{cm} : Módulo de elasticidad secante, a 28 días (en MPa).

α_{AR} Es un coeficiente reductor cuyo valor se sitúa entre 0,80 y 0,85, dependiendo del contenido de árido reciclado utilizado

f_c : Resistencia a compresión, a 28 días (en MPa)

AR: Contenido de árido grueso reciclado mixto (en kg/m³)

La adición de 20 kg/m³ de fibras de acero no modifica el comportamiento $\sigma - \varepsilon$ del hormigón en la fase pre-fisuración. Por tanto, no resulta necesario introducir un factor $\tilde{\alpha}_{FIB}$ (mayor que 1,0), en las expresiones $f_c - E$ obtenidas.

La densidad del hormigón con árido reciclado es inferior a la de uno convencional debido a la menor densidad de los áridos reciclados. Ésta depende de las características del árido y de la composición del esqueleto granular. En caso de emplear un árido reciclado mixto, la reducción se sitúa entorno a los 0,04 g/cm³ por cada 100 kg de árido reciclado. Consecuentemente, en hormigones autocompactantes con un esqueleto granular compuesto al 100% por árido reciclado mixto, la reducción máxima puede alcanzar los 200 - 250 kg/m³. A falta de datos experimentales, se recomienda tomar como **densidad** de referencia un valor comprendido entre los **2050 y los 2150 kg/m³**.

La utilización de un hormigón fabricado al 100 % por árido grueso reciclado mixto no implica adoptar coeficientes de seguridad mayores. La variabilidad en este tipo de hormigones entra dentro de los márgenes de seguridad adoptados con el coeficiente γ_c actualmente establecido en la instrucción EHE-08.

7.4 RECOMENDACIONES RELATIVAS AL PROCESO DE FABRICACIÓN

En la fabricación de hormigones reciclados se podrán emplear todo tipo de árido, independientemente de su naturaleza, siempre y cuando satisfaga las limitaciones impuestas en el articulado de la EHE-08. En este sentido, se recomienda no imponer *a priori* restricciones relacionadas con la absorción máxima, ni de la composición del árido (concretamente la limitación del 5 % de material cerámico)

La mayor **absorción** que presentan los áridos reciclados mixtos en comparación con los procedentes del machaqueo del hormigón o los áridos naturales, no supone un impedimento para su utilización. Eso sí, a fin de que los áridos reciclados no absorban parte del agua destinada a la hidratación del cemento, y consecuentemente, se reduzca la relación agua/cemento efectiva, resulta necesario **modificar el proceso de fabricación**.

Los dos métodos de pre-saturación empleados en las campañas experimentales (saturación con agua y aditivo hidrófugo), tienen aspectos positivos y negativos. En caso de utilizar áridos reciclados mixtos de absorción superior a la limitación actual del 7 % de la EHE-08, parece más recomendable el método de pre-saturación con agua, dado el riesgo que parte del aditivo hidrófugo sea absorbido por los propios áridos, y por ende, no sea muy efectivo. Este hecho puede corregirse incrementando, o bien el contenido del aditivo hidrófugo o de superplastificante, lo que trae consigo un incremento del coste del hormigón fabricado, haciéndolo menos competitivo económicamente.

En caso de llevar a cabo el método de pre-saturación con agua, el cálculo del agua de saturación viene determinado por la expresión [7.3], que depende de dos variables: la capacidad de absorción de agua de los áridos (y su cinética), y la humedad presente en éstos.

$$\text{Agua de saturación (\% s.p. AR)} = (WA_{24h} - h) \cdot \beta \quad [7.3]$$

donde: WA_{24h} : Absorción de agua a las 24h (en %)

h: Humedad de los áridos (en %)

β : Relación entre agua absorbida a los 10 min y a las 24 h $\approx 0.75 - 0.85$.

Se adopta como valor de referencia la absorción a los 10 minutos (por medio del parámetro β), dado que es el tiempo estimado que puede transcurrir desde que los áridos reciclados se introducen en la dosificadora, hasta que se da por finalizado el proceso de amasado.

Para evitar elevadas fluctuaciones en el grado de humedad de los áridos reciclados, se recomienda que éstos se encuentren almacenados en silos, o en su defecto, en acopios protegidos de la intemperie. En caso que esto no sea posible, se recomienda realizar

controles periódicos (frecuencia diaria/semanal) a fin de conocer en todo momento su humedad.

El comportamiento observado en el aditivo hidrófugo no debe ser excluyente para que éste pueda resultar atractivo en otras aplicaciones. Un posible campo de aplicación puede ser el tratamiento de áridos reciclados procedentes del machaqueo de hormigón, con absorciones habitualmente comprendidas entre el 2 y el 5 %. En este rango, la pre-saturación de los áridos sigue siendo un tema a considerar, pero no es tan elevada para que se reproduzcan los problemas detectados. Otro de los beneficios que aporta el uso de un aditivo hidrófugo es independizar de la dosificación las propiedades de los áridos reciclados a tratar, como la absorción y el grado de humedad, necesarios para calcular el agua de saturación a aportar.

En caso de querer obtener un hormigón autocompactante con árido reciclado y fibras, puede resultar necesario incrementar el contenido de finos y/o de aditivo superplastificante. Si se opta por la primera opción, puede repercutir sobre las propiedades físicas y resistentes del hormigón, acentuando el descenso de la densidad y resistencias. Por el contrario, incrementar el contenido de aditivo superplastificante, puede incrementar el coste del hormigón resultante, y desincentivar su uso.

7.5 RECOMENDACIONES RELATIVAS A PUESTA EN OBRA

El empleo de un hormigón autocompactante reforzado con fibras permite agilizar el procedimiento constructivo, ya que se eliminan las fases de montaje de la armadura convencional y de vibrado del hormigón. De este modo, se consigue una reducción de costes debido a unos menores plazos de ejecución, así como un mejor ambiente de trabajo (menos ruidos, vibraciones y accidentes relacionados con el ferrallado, como pinchazos y cortes). La utilización de áridos reciclados no implica cambios en cuanto a la puesta en obra.

En caso de verter el hormigón con cubilote y tubo tremie, la dirección vertical de vertido provoca una orientación preferente de las fibras en sentido vertical. Este fenómeno se acentúa bajo las siguientes circunstancias: (1) cuanto mayor sea la longitud de las fibras; (2) cuanto menor sea la distancia a recorrer por las fibras; (3) cuanto menos fluida sea la consistencia del hormigón. Este fenómeno puede resultar beneficioso en aquellos elementos estructurales en los que, debido a las solicitaciones actuantes, sea conveniente una orientación preferente de las fibras en sentido vertical.

En el caso de utilizar el bombeo como sistema de puesta en obra, habrá que prestar atención especial, dada la alta porosidad de los áridos reciclados. En caso que éstos no estén completamente pre-saturados, podrían absorber parte del agua en el bombeo y, consecuentemente, modificar de forma significativa la trabajabilidad del hormigón a la salida de la tubería.

7.6 CONCLUSIONES

Para finalizar el capítulo se enuncian las conclusiones y recomendaciones de la experiencia realizada:

- La utilización de áridos reciclados altera mínimamente el proceso de fabricación. La única modificación, a realizar en primer lugar, es aportar el agua necesaria que sature los áridos reciclados.
- La consistencia del hormigón en estado fresco satisface los requisitos de autocompactabilidad. Ello permite rellenar por completo el molde metálico sin necesidad de realizar el vibrado.
- Las resistencias a compresión y flexión obtenidas (45 MPa y 6,2 MPa, a 28 días, respectivamente), son suficientemente elevadas para la aplicación estudiada.
- El uso de áridos reciclados confiere al hormigón un aspecto visual agradable. Lo que puede favorecer su aceptación desde el punto de vista social. Puede resultar interesante reproducir la experiencia realizada empleando un árido reciclado mixto (con un % de cerámica y material bituminoso, superiores), a fin de modificar en mayor medida su aspecto exterior. De esta forma se consigue un producto novedoso y con alto valor añadido, diferenciándose del hormigón convencional.

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones que se han obtenido a partir de los estudios realizados en la Tesis Doctoral. Éstas se enuncian en tres apartados: conclusiones generales (Apartado 8.2), conclusiones específicas (Apartado 8.3) y futuras líneas de investigación (Apartado 8.4).

Las conclusiones generales responden al objetivo principal planteado en el capítulo 1, consistente en la validación de un hormigón fabricado al 100 % por árido reciclado grueso en usos estructurales, y se fundamentan en los resultados obtenidos durante las campañas experimentales. En cambio, las conclusiones específicas se derivan de aspectos más concretos analizados en cada uno de los estudios realizados, y que fueron expuestos en la Tabla 1.2.

8.2 CONCLUSIONES GENERALES

Se ha conseguido obtener un hormigón con una fracción gruesa compuesta al 100 % por árido reciclado mixto, de propiedades autocompactantes, y reforzado con fibras de acero, que resulta viable para usos estructurales, tanto en elementos hormigonados *in situ* (como los bataches ejecutados durante la prueba piloto), como en elementos

prefabricados (como la pieza de mobiliario urbano realizado en las instalaciones de la empresa ESCOFET 1886, S.A).

A pesar que la sustitución de los áridos naturales por reciclados provoca una pérdida de propiedades físicas y mecánicas, tales como la densidad, la resistencia a compresión o el módulo de elasticidad, entre otras; las prestaciones alcanzadas son suficientemente elevadas como para considerar apto el hormigón en numerosas aplicaciones estructurales. Una de las tipologías más adecuadas para este tipo de hormigón pueden ser las cimentaciones, donde es habitual la utilización de hormigones con resistencia de proyecto no inferior a 25 MPa (HA-25).

8.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

8.3.1 Proceso de fabricación del hormigón con árido reciclado y fibras

- Se ha conseguido establecer un sistema de fabricación adecuado para los hormigones autocompactantes con árido reciclado y fibras de acero. Respecto a la metodología utilizada para hormigones convencionales, es necesario tratar previamente los áridos reciclados, a fin de evitar que absorban parte del agua destinada a la hidratación del cemento, y así tener controlada la relación agua/cemento efectiva.
- Se han analizado dos tipos de tratamientos: la pre-saturación con agua y el empleo de un aditivo experimental hidrófugo. Entre los dos métodos, de acuerdo con los resultados obtenidos, ha sido más efectiva la pre-saturación de los áridos con agua. En este tratamiento, el agua de saturación se introduce junto con los áridos reciclados antes de iniciar el proceso de mezcla del resto de componentes del hormigón. El contenido de agua viene dado por la humedad de los áridos en el momento de fabricación y por su capacidad de absorción de agua en 5-10 minutos. Por tanto, resulta necesario realizar previamente una caracterización de los áridos reciclados y un control periódico de las condiciones de almacenamiento de los mismos.
- En ambos casos, el tratamiento de pre-saturación necesario supone un incremento del tiempo de amasado, de entre 3 y 4 minutos, respecto al necesario en un hormigón convencional. Sin embargo, esta demora queda compensada durante la puesta en obra debido a la autocompactabilidad del hormigón y el empleo de fibras de acero, que reducen los plazos de ejecución.
- La pre-saturación con agua resulta más sencilla y económica, si bien, el contenido de agua de saturación a aportar es variable, y depende del tipo de árido a saturar y de las condiciones ambientales.

- La pre-saturación con el aditivo hidrófugo experimental requiere de un mayor estudio. El contenido establecido (de forma previa por la empresa suministradora) en 0,23 % sobre el peso de árido reciclado no ha resultado suficiente para envolverlos completamente, y evitar que parte del agua destinada a la hidratación del cemento fuera absorbida por los áridos reciclados. Ello ha provocado que la dosificación HRM/AC20+I, obtuviera una menor trabajabilidad en estado fresco, que tuvo que ser corregida aumentando el contenido de aditivo superplastificante, del 2,0 al 2,5 % s.p.c.
- Una vez saturados los áridos reciclados, éstos no alteran la consistencia del hormigón en estado fresco. Incluso, dado que la absorción de agua por parte de los áridos naturales no es nula (si bien, es despreciable), pueden llegarse a obtener consistencias más fluidas si se introducen los áridos reciclados en estado saturado con superficie seca.
- Las fibras de acero reducen la capacidad de fluir del hormigón en estado fresco, acentuándose para las fibras de mayor longitud. En caso de emplear fibras de longitud ≥ 50 mm, para contrarrestar este efecto restrictivo resulta necesario incrementar el contenido de árido fino y de aditivo superplastificante en la dosificación.
- Durante la fabricación de los diferentes hormigones, no se produjeron incidencias remarcables. Todas las amasadas alcanzaron el diámetro de extensión de flujo necesario (55 cm) y no hubo que desechar ninguna cuba de hormigón.

8.3.2 Puesta en obra del hormigón con árido reciclado y fibras

- La ejecución de los seis batches durante la prueba piloto resultó satisfactoria. Todas las dosificaciones realizadas mantuvieron las propiedades autocompactantes durante su puesta en obra, transcurridos entre 30 y 45 minutos desde su fabricación en la planta de hormigonado.
- La puesta en obra no modifica las propiedades mecánicas del hormigón. Los resultados obtenidos de las probetas moldeadas en planta y de las probetas testigo extraídas de los batches han sido muy similares. La mayor dispersión en los valores obtenidos correspondientes a las probetas testigos no puede relacionarse con un procedimiento constructivo defectuoso, sino por las diferentes condiciones de curado (las probetas moldeadas se conservaron en cámara húmeda hasta su ensayo) y por el mayor número de muestras analizadas.
- La dirección de hormigonado en obra, así como la geometría de las fibras de acero, influyen sobre la disposición de las fibras en el elemento estructural. Cuanto

mayor sea la longitud de las fibras, menor capacidad de rotación tienen. En nuestro caso, el vertido del hormigón con tubo tremie se realizó en dirección vertical, lo que provoca que hasta un 40-50 % del total de las fibras M502 distribuidas en el batache #6 quedaron orientadas según esta dirección. En cambio, en las probetas moldeadas con esa misma dosificación, este porcentaje apenas supone el 20-25 % del total. Este fenómeno puede ser positivo en aquellos elementos estructurales en los que, debido a las solicitaciones actuantes, sea conveniente una orientación preferente de las fibras en sentido vertical.

- El hecho de que durante la ejecución de los bataches, el tubo tremie se mantuviera fijo en la parte profunda de la zanja, ha influido en la distribución de los dos hormigones que componen el batache #3: la dosificación patrón sin árido reciclado (HM/AC12) y la dosificación HRM/AC12. A pesar de que ambos hormigones se vertieron con un intervalo de tiempo de apenas 15-20 minutos, no se ha producido la mezcla entre ellos. El hecho que el hormigón con árido reciclado, de menor densidad, se vertiera en segundo lugar, ha podido facilitar que no se produzca una mayor interacción entre ambos hormigones. Ello puede abrir nuevas perspectivas desde el punto de vista comercial, tales como la producción de elementos arquitectónicos o de mobiliario urbano, compuestos por una combinación de hormigones convencionales y con áridos reciclados
- A partir de la inspección visual de las losas y testigos obtenidos tras la fragmentación de los bataches, puede confirmarse que todos los hormigones fluyeron correctamente, rellenando completamente la zanja excavada, sin producirse coqueas, intrusiones de tierra o cualquier otro tipo de anomalías en el elemento estructural.

8.3.3 Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del material

- La densidad del hormigón con árido reciclado es inferior a la de los hormigones convencionales debido a la menor densidad de los áridos reciclados. Ésta depende de las características del árido y de la composición del esqueleto granular. En caso de emplear un árido reciclado mixto, la reducción se sitúa entre los 30 y 40 kg/m³ por cada 100 kg de árido reciclado. En hormigones autocompactantes con un esqueleto granular compuesto al 100% por árido reciclado mixto, la reducción puede alcanzar los 200 - 250 kg/m³, hasta valores comprendidos entre 2000 y 2200 kg/m³.
- Tanto la resistencia a compresión como el módulo de elasticidad se ven reducidos entre un 30 y un 40 % por la utilización de los áridos reciclados mixtos. De todos modos, las resistencias alcanzadas a 28 días, de entre los 35 y 40 MPa, son totalmente válidas para aplicaciones estructurales.

- La reducción del módulo de elasticidad a valores comprendidos entre los 23 y los 29 GPa, puede restringir el uso de estos hormigones en aplicaciones estructurales con exigencias relacionadas con deformaciones o flechas máximas, tales como puentes o pasarelas. Sin embargo, no suponen una gran problemática en otras tipologías estructurales como las estructuras de cimentación.
- La resistencia a tracción se reduce de forma similar a la resistencia a compresión, por lo que las expresiones que relacionan ambas propiedades son válidas en hormigones con áridos reciclados.

8.3.4 Estudio de la durabilidad del material

El uso de árido reciclado mixto conduce a hormigones de durabilidad adecuada, y equivalente a los convencionales, cumpliendo con los requisitos impuestos. En los tres ensayos realizados, la durabilidad viene condicionada en mayor grado por el proceso de fabricación que por la propia utilización de áridos reciclados y/o fibras de acero. Las mejores prestaciones se alcanzan con las tres dosificaciones fabricadas durante la 2ª fase de la campaña experimental (HRM/AC20+I; HRF/AC12-35b y HRF/AC20-50), donde el proceso de saturación de los áridos reciclados se realizó de forma más controlada.

- Los valores de penetración de agua a presión obtenidos son inferiores a los valores máximos establecidos en el Artículo 37.3.3 de la instrucción EHE-08, incluso para las clases de exposición ambiental más agresivos (IIIc, Qc, Qb). Por tanto, puede considerarse como un material válido para hacer frente a los ambientes con elevados contenidos de cloruros y/o sulfatos.
- Las deformaciones registradas durante el ensayo de reacción sulfática interna, se sitúan en el rango comprendido entre los 0,1 y los 0,5 mm/m. Las expansiones se deben al entumecimiento del hormigón y no al yeso presente en el árido reciclado mixto.
- Los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos ($1 \cdot 10^{-11}$ a $5 \cdot 10^{-11}$ m²/s), son similares a los calculados por otros autores, y se sitúan en el rango habitual de los hormigones convencionales.

8.3.5 Estudio del comportamiento estructural

- En relación a la variabilidad del peso específico en función de la cota del batche, se detecta un comportamiento opuesto entre los elementos fabricados de HRM y HRF. Los primeros son más densos en las cotas más profundas (debido a la compactación por peso propio); en cambio, los segundos son menos variables. Ello puede deberse a una cierta restricción del movimiento por parte de las fibras de

acero, que impide una mayor acumulación de áridos en la parte profunda de los bataches de HRF.

- Debido a la orientación preferente de las fibras en dirección vertical, y de otros fenómenos como el efecto pared (que tiende a orientar las fibras de forma paralela a la superficie) y la geometría irregular de los testigos prismáticos extraídos de los bataches, no puede evaluarse de forma adecuada el comportamiento post-fisuración del hormigón. Algunas muestras rompen de forma frágil, mientras que otras alcanzan resistencias residuales superiores a los 2 N/mm².
- La variabilidad del resto de propiedades analizadas en el batache entra dentro de los rangos habituales.
- Los resultados del ensayo a flexión de las losas se han visto alterados por la presencia de barras de acero no previstas inicialmente (colocadas para facilitar el izado y retirada de los bataches de la obra), y por una geometría irregular, debido a un proceso de corte defectuoso, y a la rugosidad del contacto entre terreno y estructura.
- Las cargas de fisuración obtenidas son inferiores a las inicialmente previstas. Ello puede deberse a la presencia de microfisuras producidas durante el proceso de obtención de las losas (corte con hilo de diamante); o bien, a una concentración de tensiones en los puntos de menor espesor.
- El contenido de fibras de 20 kg/m³, así como la configuración del ensayo, provoca que la rotura se produzca tras generarse una (o dos) fisura(s), situadas alrededor de la sección más solicitada (centro luz).
- Las cargas residuales en las losas ensayadas de HRF son muy superiores a las teóricamente esperadas (y calculadas según los resultados del ensayo de testigos prismáticos), debido a una mayor número de fibras orientadas verticalmente, y por tanto, contribuyendo al cosido de la fisura producida.

8.3.6 Implementación de este tipo de hormigones en un proceso industrial

- La utilización de áridos reciclados altera el proceso de fabricación. La única modificación, a realizar en primer lugar, es aportar el agua necesaria que sature los áridos reciclados.
- La consistencia del hormigón en estado fresco satisface los requisitos de autocompactabilidad. Ello permite rellenar por completo el molde metálico sin necesidad de realizar tareas de vibrado, reduciendo la contaminación acústica y vibraciones, especialmente molestas en estancias cerradas, tales como naves industriales.

- Las resistencias a compresión y flexión obtenidas (45 MPa y 6,2 MPa, a 28 días, respectivamente), superan los valores exigidos para las piezas de mobiliario urbano.
- El uso de áridos reciclados confiere al elemento fabricado, denominado BANCO MODULAR, un aspecto visual agradable, con una mayor variedad cromática que la versión actual del catálogo, gracias a las tonalidades dadas por el material cerámico y asfáltico, dando un valor añadido al producto, tanto desde el punto de vista social y comercial.

8.3.7 Propuestas de modificación del articulado de la Instrucción EHE-08

- Se recomienda ampliar la definición de hormigón reciclado (HR), a todos aquellos hormigones fabricados con árido grueso reciclado, independientemente de si proceden del machaqueo de hormigón (definición actual) o mixto.
- Para su aplicación en hormigón estructural, se recomienda no imponer *a priori* una restricción relativa al porcentaje máximo de sustitución de la fracción gruesa (actualmente del 20 %). Los resultados obtenidos en esta tesis, demuestran la viabilidad técnica de emplear, con totales garantías, una sustitución de hasta el 100 %.
- A falta de datos experimentales, se recomienda tomar como densidad de referencia un valor comprendido entre los 2050 y los 2150 kg/m³.
- La completa sustitución de la fracción gruesa también altera la relación entre resistencia a compresión (f_c) y módulo de elasticidad (E_{cm}). Tomando en cuenta las formulaciones propuestas actualmente por la ACI o la EHE-08, se propone introducir un coeficiente reductor α_{AR} , que depende del contenido de árido reciclado utilizado (AR), y que se encuentra comprendido entre 0,80 y 0,85.

$$E_{cm} = 8500 \cdot \tilde{\alpha}_{AR} \cdot \sqrt[3]{f_c} = 8500 \cdot (1 - 0.000216 \cdot AR) \cdot \sqrt[3]{f_c}$$

$$E_{cm} = 4700 \cdot \alpha_{AR} \cdot \sqrt[2]{f_c} = 4700 \cdot (1 - 0.000268 \cdot AR) \cdot \sqrt[2]{f_c}$$

- La utilización de un hormigón fabricado al 100 % por árido grueso reciclado mixto no implica adoptar coeficientes de seguridad mayores. La variabilidad en este tipo de hormigones entra dentro de los márgenes de seguridad adoptados con el coeficiente γ_c actualmente establecido en la instrucción EHE-08.

8.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo desarrollado en esta Tesis Doctoral supone un avance significativo en relación al conocimiento de un hormigón más sostenible, compuesto al 100 % por áridos reciclados mixtos y reforzados con fibras de acero. Sin embargo, partiendo del trabajo expuesto, es necesario seguir profundizando en una serie de aspectos, como los propuestos a continuación:

Durante las campañas experimentales, se han fabricado un total de seis dosificaciones: una patrón (HM/AC12), y cinco con áridos reciclados, de las cuales dos de ellas contenían fibras de acero. En futuros estudios, puede ser interesante ampliar el número de dosificaciones., pudiendo trabajar en tres líneas de investigación diferentes:

- Incrementar el contenido de fibras de acero. En esta tesis, se ha limitado el contenido de fibras de acero en las dosificaciones HRF a 20 kg/m³. Ello provoca que el comportamiento post-fisuración del hormigón sea tipo *softening*, con resistencias residuales inferiores a la carga de fisuración. Con un mayor contenido de fibras, podría ampliarse el abanico de posibilidades de este tipo de hormigón a un mayor número de aplicaciones estructurales.
- Realizar una dosificación compuesta al 100 % por árido reciclado: ampliando la sustitución a la fracción fina del esqueleto granular.
- Desarrollar un hormigón “ecológico”, que además de incorporar áridos reciclados, minimice al máximo posible el contenido de los materiales más contaminantes, como el cemento y los aditivos.
- Las propuestas anteriores, pueden requerir del empleo de un filler natural o adiciones, a fin de mejorar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco.

Realizar estudios económicos sobre la viabilidad económica de utilizar áridos reciclados, introduciendo aspectos como los costes de transporte, costes asociados al mayor contenido de cemento y aditivos necesarios, costes de producción, costes de pre-saturación áridos reciclados, etc.

Dada la alta variabilidad de los áridos reciclados, proponer formulaciones específicas dependiendo de su composición: áridos reciclados de hormigón (ARH), áridos reciclados mixtos (ARM), áridos reciclados cerámicos (ARC), etc.

Puede plantearse ampliar el estudio relacionado con la durabilidad de este tipo de hormigones con la realización de otros ensayos habituales, tales como la resistencia a la carbonatación, a ciclos de hielo – deshielo, o debido a una fuente de sulfatos externa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318 (2005). Requisitos de reglamento para concreto estructural (Versión en español y en sistema métrico). Comité ACI 318. American Concrete Institute

AENOR (1996a). UNE-EN 933-2. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

AENOR (1996b). UNE 83316. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.

AENOR (1998). UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

AENOR (1999). UNE-EN 1097-3. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.

AENOR (2001). UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de las partículas y la absorción de agua. 2001.

AENOR (2005). UNE-EN 83512-1. Hormigones con fibras. Determinación del contenido de fibras de acero.

AENOR (2007a). UNE-EN 1936. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total

AENOR (2007b). UNE-EN 14651. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).

AENOR (2009a). UNE-EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.

AENOR (2009b). UNE-EN 12390-5. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas.

AENOR (2009c). UNE-EN 12390-8. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.

AENOR (2010). UNE 83515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.

AENOR (2011a). UNE-EN 12350-8. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.

AENOR (2011b). UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de las probetas.

Agència de Residus de Catalunya AGR. (2011). Residus de la Construcció. Informe 2011. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya.

Agència de Residus de Catalunya AGR. (2013). Residus de la Construcció. Informe 2013. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya.

Agrela, F.; Barbudo, A.; Ramírez, A.; Ayuso, J.; Carvajal, M.D. y Jiménez, J.R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, pp. 98-106.

Aire, C.; Molins, C. y Aguado, A. (2013). Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta. *Concreto y Cemento. Investigación y desarrollo*. Vol.5, No.1, pp.17-31. Julio -Diciembre 2013

Amorim, P.; de Brito, J. y Evangelista, L. (2012). Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability. *ACI Materials Journal*, Vol.109, No.2, pp.195-204.

Andrade, C.; Castellote, M.; Alonso, C. y González, C. (1999). Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration test of type of standard ASTM C1202-91. *Cement and Concrete Research*, 29, pp.417-421.

Ann, K.Y.; Moon, H.Y.; Kim, Y.B. y Ryou, J. (2008). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*, 28, pp. 993-999.

Angulo, S.C.; Carrijo, P.M; Figueiredo, A.D.; Chaves, A.P. y John, V.M. (2009). On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Materials and Structures*, 43, pp. 519-528.

Barbudo, A.; Galvín, A.P.; Agrela, F.; Ayuso, J. y Jiménez, J.R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management*, 32, pp. 1229-1235.

Baroghel-Bouny, V.; Belin, P.; Maultzsch, M. y Henry, D. (2007). AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Non-steady-state diffusion tests and exposure to natural conditions. *Materials and Structures*, 40, pp.759-781.

Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

Barros, J.A.O.; Cunha, V.M.C.F.; Ribeiro, A.F. y Antunes, J.A.B. (2005). Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 38, pp. 47-56.

Bazaz, J. B. y Khayati, M. (2012). Properties and Performance of Concrete Made with Recycled Low-Quality Crushed Brick. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 24, No. 4. April 2012, ASCE.

Behera, M.; Bhattacharyya, S.K; Minocha, A.K.; Deoliya, R. y Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, pp. 501-516.

Beltrán, M.G.; Agrela, F.; Barbudo, A.; Ayuso, J. y Ramírez, A. (2014). Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 72, pp. 231-238.

Bermúdez, M.A. y Alaejos, P. (2008). Comparative study of different test methods for reinforced concrete durability assessment in marine environment. *Materials and Structures*, 41, pp. 527-541.

Bravo, M.; de Brito, J.; Pontes, J. y Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, pp. 357-369.

Blanco, A (2013). Characterization and modelling of SFRC elements. Doctoral thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Buyle-Bodin, F. y Hadjieva-Zaharieva, R. (2002). Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*, Vol.35, pp. 504-509.

Cabral, A.E.B.; Schalch, V.; Molin, D.C.C.D. y Ribeiro, J.L.D. (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 421-430.

Cachim, P.B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 1292-1297.

Carmona, S.; Aguado, A. y Molins, C. (2012) Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. *Materials and Structures*, 45(7), pp. 1053-1069.

Cavalaro, S. (2009). Aspectos tecnológicos de túneles construidos con tuneladora y dovelas prefabricadas de hormigón. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Cavalaro, S.H.P; López-Carreño, R.; Torrents, J.M.; Aguado, A. y Juan-García, P. (2015). Assessment of fibre content and 3D profil in cylindrical SFRC specimens. *Materials and Structures*. DOI 10.1617/s11527-014-0521-2

CEP-FIB (2010). Model Code 2010. Comité Euro-International du Béton.

CNR-DT 204 (2006). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture Fibrorinforzate, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia

Colleparidi, M. (1995). Proceedings of the International RILEM Workshop, St. Rémy-les-Chevreuse, France, p.10.

Comisión Permanente del Hormigón. CPH (2008). Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Madrid.

Costa, A. y Appleton, J. (1999). Chloride penetration into concrete in marine environment – Part I: Main parameters affecting chloride penetration. *Materials and Structures*, Vol.32, pp. 252-259.

Corinaldesi, V. y Moriconi, G. (2004). Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 249-254.

Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behavior of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24, pp.1616-1620.

DBV (2001). Merkblatt Stahlfaserbeton, Deutsche Beton Vereins.

Debieb, F.; Courard, L.; Kenai, S. y Degeimbre, R. (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 421-426.

de la Fuente, A. (2011). Nueva metodología para el diseño de tubos de hormigón estructural. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

de la Fuente, A.; Pujadas, P.; Blanco, A. y Aguado, A. (2012a). Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunneling and Underground Space Technology*. 27, pp. 60-71.

de la Fuente, A.; Escariz, R.C.; de Figueiredo, A.D.; Molins, C. y Aguado, A. (2012b). A new design model for Steel fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*. 30, pp. 547-556.

De Schutter, G. y Audenaert, K. (2008). Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 41, pp.225-233.

Dhir, R.K; Limbachiya, M.C. y Leelawat, T. (1999). Suitability of recycled aggregate for use in BS 5328 designates mixes. *Proc. Inst. Civil Engineering*, 134, pp. 257-274.

Dillmann, R. (1998). Concrete with recycled concrete aggregate. In: *Proceedings of international symposium on sustainable construction: use of recycled concrete aggregate*. Dundee, Scotland, pp. 239-253.

Djerbi Tegguer, A. (2012). Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*, 27, pp. 112-116.

Domingo-Cabo, A.; Lázaro, C.; López-Gayarre, F.; Serrano-López, M.A., Serna, P. y Castaño-Tabares, J.O. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2545-2553.

dos Santos, A.C.P. (2010). Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactantes asociadas al esqueleto granular. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

dos Santos, A.C.P.; Ortiz-Lozano, J.A.; Villegas, N. y Aguado, A. (2015). Experimental study about the effects of granular skeleton distribution on the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). *Construction and Building Materials*, 78, pp. 40-49.

El-Dieb, A.S. y Reda Taha, M.M. (2012). Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Construction and Building Materials*, 27, pp. 585-596.

ENV 1992-1-1 (1992) Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General rules and rules for buildings, CEN.

Etxeberria, M.; Marí, A.R. y Vázquez, E. (2007a). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40, pp. 529-541.

Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A. y Barra, M. (2007b). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 735-742.

Evangelista, L. y de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 397-408.

Evangelista, L. y de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 9-14.

Fathifazl, G.; Abbas, A.; Razaqpur, A.G.; Isgor, O.B.; Fournier, B. y Foo, S. (2009). New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE, 21, pp. 601-611.

Fathifazl, G. y Razaqpur, A.G (2013). Creep rheological models for recycled aggregate concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 110, No.2, pp. 115-126. March-April 2013.

Fernández Cánovas, M (1980). Entumecimiento higrométrico del hormigón. *Materiales de Construcción*. No. 177, pp. 27-43.

Ferrara, L.; Park, Y-D. y Shah, S. P. (2007). A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 957-971.

FIB Model Code (2010). Fibre reinforced concrete. First complete draft. Fédération International du Béton, Suiza.

García, J.; Rodríguez, D.; Juan, A.; Moran, J.M. y Guerra, M.I. (2014). Pre-saturación de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición para la fabricación de hormigones eco-eficientes. VI Congreso ACHE. Madrid.

GERD. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. (2012). Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Proyecto GEAR

Geraldes, V.L. (2013). Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido de sulfatos. Tesos Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid

González-Corominas, A. y Exteberría, M. (2014). Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials*, 68, pp. 618-626.

González-Fonteboá, B.; Martínez-Abella, F.; Eiras-López, J. y Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures*, 44, pp.1759-1771.

Grdic, Z.J.; Toplicic-Curic, G. A.; Despotovic, I.M. y Ristic, N.S. (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1129-1133.

Grünwald, S. y Walraven J.C. (2001). Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1793-1798.

Güneyisi, E.; Gesoglu, M.; Algin, Z. y Yazici, H. (2014). Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, pp. 172-183.

He, F.; Shi, C.; Yuan, Q.; Chen, C. y Zheng, K. (2012). AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. *Construction and Building Materials*, 26, pp. 1-8.

Henry, M.; Pardo, G.; Nishimura, T. y Kato, Y. (2011). Balancing durability and environmental impact in concrete combining recycled aggregates and mineral admixtures. *Resources, Conservation, and Recycling*, 55, pp. 1060-1069.

Herrador, R.; Pérez, P.; Garach, L. y Ordoñez, J. (2012). Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road coarse surfacing. *Journal of Transportation Engineering*. ASCE, 138, pp. 182-190.

IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Investigación prenormativa. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno vasco. Mayo 2011. Bilbao.

INE. Instituto Nacional de Estadística (2009). Desarrollo sostenible 2008: Principales indicadores de España para el seguimiento de la estrategia de DS de la UE, Madrid, 2009.

Jiménez, J.R.; Agrela, F.; Ayuso, J. y López, M. (2011). Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de carreteras. *Materiales de Construcción*, Vol.61, 302, pp. 289-302.

Jiménez, C.; Barra, M.; Josa, A. y Valls, S. (2015). LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic method. *Construction and Building Materials*, 84, pp. 245-252.

Jones. R (1962). Non-destructive testing of Concrete. Cambridge University Press. London.

Kakizaki, M.; Harada, M.; Soshiroda, T.; Kubota, S.; Ikeda, T. y Kasai, Y. (1988). Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete. *Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on demolition and reuse concrete and masonry*. Tokyo, Japan, pp. 565-574.

Khalaf, F.M.; DeVenny, A.S. (2004). Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 16, pp. 331-340.

Klein, N.S. (2012). El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Klein, N.S; Aguado, A.; Toralles-Carbonari, B.M. y Real, L.V. (2014). Prediction of the water absorption by aggregates over time: Modelling through the use of value function and experimental validation. *Construction and Building Materials*, 69, pp. 213-220.

Kou, S.C. y Poon, C.S. (2006). Compressive strength, pore distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class F fly ash. *J Wuhan University Technology*, 21(4), pp.130-136.

Kou, S.C. y Poon, C.S. (2008). Mechanical properties of 5-year old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, 60(1). pp. 57-64.

Kou, S.C. y Poon, C.S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31, pp. 622-627.

Kou, S.C. y Poon, C.S. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 17, pp. 12-19.

Kwan, W.H.; Ramli, M.; Kam, K.J. y Sulieman, M.Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26, pp. 565-573.

Leite, M.A (2001). Evaluation of mechanical properties of concretes produced with recycled aggregates of construction and demolition wastes. PhD Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre

Leite, M.B.; Figueiredo Filho, J.G.L. y Lima, P.R.L. (2013). Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. *Materials and Structures*, 46, pp. 1765-1778.

Levy, S.M. y Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 1975-1980.

Li, J.B. (2004). Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete. Dissertation of Masteral Degree. Tongji University, Shanghai.

Limbachiya, M.C.; Leelawat, T. y Dhir, R.K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, Vol.33, pp. 574-580.

Lovato, P.S (2007). Parameters control verification of recycled aggregates from construction and demolition waste to concrete use. Master Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre

Martín-Morales, M.; Zamorano, M.; Ruiz-Moyano, A. y Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 25, pp. 742-748.

Martínez-Lage, I.; Martínez-Abella, F.; Vázquez-Herrero, C. y Pérez-Ordoñez, J.L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 37, pp. 171-176.

Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A. y Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 44, pp. 101-109.

McNeil, K. y Kang, T.H-K. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Vol.7, No.1, pp. 61-69.

Medina, C.; Sánchez de Rojas, M.I. y Frías, M. (2013). Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 40, pp. 151-160.

Mellmann, G. (1999). Processed concrete rubble for the reuse as aggregate. *In: Proceedings of the international seminar on exploiting waste in concrete*, Dundee, Scotland, pp. 171-178.

Molins, C.; Aguado, A. y Saludes, S. (2009) Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). *Materials and Structures*, 42(4), pp. 415-425.

NBR 6118 (2014). Norma Brasileira. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Associação brasileira de normas técnicas,

NORDTEST (1999). NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady migration experiments. Espoo. Finland.

Okamura, H. y Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol.1, No.1, pp. 5-15.

Orbe, A.; Cuadrado, J.; Losada, R. y Rojí, E. (2012). Framework for the design and analysis of Steel fiber reinforced self-compacting structures. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 676-686.

Orbe, A. (2013). Optimización del uso de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero en aplicaciones convencionales de resistencias moderadas. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. Bilbao.

Otsuki, N.; Nagataki, S. y Nakashita, K. (1992). Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *ACI Materials Journal*, 89(6), pp. 587-592.

Park, T. (2003). Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 129, pp. 558-563.

Parmentier, B.; De Grove, E.; Vandewalle, L. y Van Rickstal, F. (2008) Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending tests. In Walraven Stoelhost. *fib Symposium "Tailor Made Concrete Structures"*. Amsterdam: Taylor & Francis Group, pp. 507-512

Pedro, D.; de Brito, J. y Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*, 71, pp. 141-151.

Pepe, M.; Toledo Filho, R.D.; Koenders, E.A.B. y Martinelli, E. (2014). Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 69, pp. 124-132.

Pérez-Benedicto, J.A.; del Río-Merino, M.; Peralta-Canudo, J.L. y de la Rosa-La Mata, M. (2012). Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricación. *Materiales de Construcción*, Vol. 62, 305, pp. 25-37.

Poon, C.S.; Shui, Z.H. y Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, pp. 461-468.

Price, W.H (1951). Factors influencing concrete strength. *Journal of the American Concrete Institute*, February 1951, Proc. V.47, pp. 417-432.

Pujadas, P (2013). Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S. y Aguado, A. (2014a). Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 57, pp. 92-104.

Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S.H.P.; de la Fuente, A. y Aguado, A. (2014b). Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation of FRC. *Construction and Building Materials*, 58, pp. 214-224.

Ramos, H. (2012). Aplicación de Fibras Estructurales a los Pilotes tipo CPI-8. Tesis de Master. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Rao, A. (2005). Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete. Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kampur.

Rao, M.C.; Bhattacharyya, S.K. y Barai, S.V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44, pp. 205-220.

Ravindrarajah, S.R. y Tam, C.T. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), pp. 29-38.

Ravindrarajah, S.R.; Stewart, M. y Greco, D. (2000). Variability of recycled concrete aggregate and its effects on concrete properties: a case of study in Australia. In: *Proceedings international workshop on recycled aggregate*. Niigata, pp.9-25.

Richardson, A.; Coventry, K. y Bacon, J. (2011). Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 19, pp. 272-277.

RILEM TC 162-TDF (2003). Test and design methods for Steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method: Final recommendation. *Materials and Structures*. 36, pp. 560-567.

Sheen, Y-N.; Wang, H-Y.; Juang, Y-P. y Le, D-H. (2013). Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 45, pp. 298-305.

Silva, R.V; de Brito, J. y Dhir, R.K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, pp. 201-217.

Silva, R.V; de Brito, J. y Dhir, R.K. (2015a). Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: a review. *Construction and Building Materials*, 77, pp. 327-339.

Silva, R.V; de Brito, J. y Dhir, R.K. (2015b). Tensile behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 83, pp. 108-118.

Skarenhdahl, A. y Petersson, O. (2000). Self-compacting concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC. *RILEM Publications*.

Soares, D.; de Brito, J.; Ferreira, J. y Pacheco, J. (2014). Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 71, pp. 263-272.

Tam V.W.Y.; Gao, X.F. y Tam, C.M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1195-1203.

Tangchirapat, W.; Rattanashotinunt, C.; Buranasing, R. y Jaturapitakkul, C. (2013). Influence of fly ash on slump loss and strength of concrete fully incorporating recycled concrete aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25, pp. 243-251.

Tazawa, E.; Kasai, T. y Okamoto, S. (1989). Compressive strength of concrete prepared by double mixing. *Jounal Materials Concrete Structure Pavements*, 408 11), pp. 139-146.

Thomas, C.; Setién, J.; Polanco, J.A.; Alaejos, P. y Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, pp. 1054-1065.

Torrents, J.M.; Blanco, A.; Pujadas, P.; Aguado, A.; Juan-García, P. y Sánchez-Moragues, M.A. (2012). Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and Structures*, 45(10), pp.1-16.

Tosic, N.; Marinkovic, S.; Dasic, T. y Stanic, M. (2015). Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 87, pp. 766-776.

Tovar-Rodriguez, G.; Barra, M.; Pialarissi, S.; Aponte, D. y Vázquez, E. (2013). Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 38, pp. 1211-1220.

TS 500 (2000). Turkish standard. Requirements for design and construction of reinforced concrete structures

Tuyan, M.; Mardani-Aghabaglou, A. y Ramyar, K. (2014). Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials and Design*. 53, pp. 983-991.

Vanderwalle, L. et al. (2003). Recommendations of RILEM TC162-TDF: "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. σ - ϵ design method". *Materials and Structures*, Vol. 36, pp.560-567.

Vázquez, E.; Barra, M.; Aponte, D.; Jiménez, C. y Valls, S. (2014). Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials*, 67, pp. 61-67.

Villagrán-Zaccardi, Y.A.; Zega, C.J. y Di Maio, A.A. (2008). Chloride penetration and binding in recycled concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 20, pp. 449-455.

Xiao, J.Z.; Li, J.B. y Zhang, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp- 1187-1194.

Yuan, Q.; Shi, C.; He, F.; De Schutter, G.; Audenaert, K. y Zheng, K. (2008). Effect of hydroxyl ions on chloride penetration depth measurement using the colorimetric method. *Cement and Concrete Research*, 38, pp. 1177-1180.

Zega, C.J. y Di Maio, A.A. (2011). Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.23, No.3, pp. 281-286.

Zilch, K. y Roos, F. (2001). An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates. *Civil Engineers*, 76(4), pp. 187-191.

ANEJO A FICHAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES CAMPAÑA EN PLANTA UNILAND - LTE

A.1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se presentan las especificaciones y fichas técnicas de los materiales empleados en las campañas experimentales realizadas en la planta de hormigonado de la empresa UNILAND S.L y la posterior campaña de contrastación en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luís Agulló (LTE) de la UPC.

A.2 CEMENTO. CEM II/A-M (V-L) 42,5 R

A.2.1 Composición química



MUESTRA: Cemento Portland
TIPO: CEM II / A-M (V-L) 42,5 R
FABRICA: Valcarca
FECHA : 26-06-12



ENSAYOS		RESULTADOS
QUIMICOS :		
Pérdida al Fuego	%	5,01
SiO ₂	%	19,63
Al ₂ O ₃	%	5,98
Fe ₂ O ₃	%	4,68
CaO	%	57,38
MgO	%	1,64
SO ₃	%	3,54
Na ₂ O	%	0,10
K ₂ O	%	0,86
Cl	%	0,005
Alcalis equivalentes	%	0,66
StCal	%	88,52
MS	%	1,84
MF	%	1,28
SC ₃ (Silicato tricálcico)	%	27,40
SC ₂ (Silicato dicálcico)	%	35,62
AC ₃ (Aluminato tricálcico)	%	7,93
FAC ₄ (Ferritoaluminato tetracálcico)	%	14,25
Color (Y)		37,16
Anhidrido carbónico (CC ₂)	%	4,34
H ₂ O constitución (H ₂ O)	%	0,68

A.2.2 Granulometría láser

Fecha	μm 10%	μm 50%	μm 90%	% > 1μm	% > 1.5μm	% > 2μm	% > 3μm
26-jun-12	1,154	12,686	41,890	87,776	84,924	79,713	79,713
% > 4μm	% > 5μm	% > 6μm	% > 8μm	% > 12μm	% > 16μm	% > 24μm	% > 32μm
75,125	67,574	61,480	51,529	43,113	29,255	18,255	6,301
% > 48μm	% > 63μm	% > 90μm	% > 96μm	% > 128μm	% > 192μm	% > 200μm	f3T32
1,254	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,869

A.3 FIBRAS DE ACERO (MASTERFIBER 503)



The Chemical Company

FT 1.9.30

MASTERFIBER 503

Fibras de acero bajo en carbono con extremos conformados para refuerzo del hormigón.

Campo de aplicación

- Sustitución del mallazo para el control de la retracción.
- Refuerzo de hormigón proyectado.
- Refuerzo de hormigón para pavimentos y soleras industriales de espesor reducido.
- Refuerzo estructural.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Propiedades

- Gran capacidad para soportar cargas.
- Superiores propiedades mecánicas del hormigón, con mayor resistencia a flexión y tracción.
- Aumento de la tenacidad del hormigón, con mayor resistencia a impactos y esfuerzos puntuales.
- Excelente trabajabilidad.
- Control eficaz de la fisuración.
- Rotura dúctil del hormigón tras el fallo de la matriz pétreo.
- Rapidez, facilidad y calidad en la ejecución.
- Soluciones y detalles técnicos de calidad y económicamente rentables.
- Fácil dosificación y mezcla, en planta y a pie de obra, sin necesidad de herramientas especiales.

Base del material

Las fibras de acero MASTERFIBER 503 están fabricadas con alambre trefilado en frío, garantizando una alta resistencia a la tracción y ductilidad en rotura. El sistema de anclaje con extremos conformados asegura un comportamiento conjunto entre hormigón y fibra, precisando de una plastificación de los ganchos para el agotamiento en tracción. Con ello se garantiza un anclaje muy superior al existente por simple fricción entre la fibra y la matriz.

Modo de utilización

Las fibras MASTERFIBER 503 pueden añadirse al hormigón tanto en planta como a pie de obra. La introducción de las fibras MASTERFIBER 503 a pie de obra, directamente sobre el camión hormigonero, se puede efectuar de forma manual o con ayuda de medios mecánicos auxiliares (cinta transportadora, elevador, elemento de inyección, etc.).



La fibra deberá adicionarse de forma paulatina. El tiempo de mezcla adicional para la integración de las fibras es de aproximadamente 1 minuto por metro cúbico. En general el tiempo extra de amasado será de 5 a 6 minutos.

Para la adición en planta se puede repartir la fibra sobre la cinta transportadora de árido, o directamente en el interior de la amasadora.

Consumo

Para homigones de resistencias características entre 25 o 30 MPa, las dosificaciones estarán comprendidas entre los 20 y 40 Kg/m³.

Presentación

MASTERFIBER 503 se presenta en cajas de 20 Kg.

Manipulación y transporte

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de seguridad del producto.

MASTERFIBER 503 Página 1 de 2

Adding Value to Concrete



The Chemical Company

MASTERFIBER 503

Hay que tener en cuenta

- Para adición en planta no añadir la fibra de acero como primer componente.
- Para adición a pie de obra se recomienda que el camión no esté cargado más de un 85% de su capacidad.
- En todos los casos se recomienda realizar una inspección visual con objeto de verificar que la mezcla es homogénea. De no ser así seguir amasando a velocidad máxima de rotación hasta que se consiga una perfecta distribución.

Propiedades	
Material:	Fibra de acero.
Resistencia a tracción:	1200 N/mm ² ± 15%
Longitud:	35 mm ± 10%
Diámetro:	0,75 mm ± 10%
Esbeltez:	46
Nº de Fibras / Kg:	Min. 8000 u / kg
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	

NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición. BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando estos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición 03/05/2011

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

MASTERFIBER 503 Página 2 de 2

**BASF Construction
Chemicals España, S.L.**
Basters, 15
08184 Palau-Solità i Plegamans
Tel.: 93 862 00 00 - Fax: 93 862 00 20
www.basf-cc.es • aditivos@basf.com

A.4 ADITIVOS QUÍMICOS

A.4.1 Aditivo plastificante POZZOLITH 390GV



The Chemical Company

POZZOLITH 390GV

FT 1.3.27

Aditivo polifuncional para hormigón preparado y obra civil.

Campo de aplicación

POZZOLITH 390GV es un aditivo de características polifuncionales. Su efecto plastificante depende de la dosificación de aditivo empleada, permitiendo con esta versatilidad la fabricación de diferentes tipos de hormigones con un solo aditivo.

Especialmente indicado para:

- Hormigón preparado en central.
- Hormigón para obra civil.
- Aplicaciones con hormigón seco.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Propiedades

- Elevado poder plastificante.
- Efecto variable con la dosificación de aditivo.
- Prolongado mantenimiento de efecto.
- Mejora las resistencias mecánicas.
- Aumenta la durabilidad del hormigón.
- Reduce la permeabilidad y la formación de coqueas y nidos de grava.

Modo de utilización

POZZOLITH 390GV se adiciona al hormigón inmediatamente después del agua de amasado, en las plantas amasadoras. En caso de mezcla en camión, se recomienda repartir la adición en dos o tres partes para facilitar la homogeneización aunque también puede aditivarse mezclado con el agua de amasado.

No adicionar sobre la masa seca de cemento y áridos.

Dosificación

Las dosificaciones típicas de POZZOLITH 390GV son del 0,4 - 1% sobre peso de cemento.

Dosificaciones superiores son posibles para la obtención de hormigones con prolongado mantenimiento de la trabajabilidad, siempre que se realicen ensayos que verifiquen el efecto del. Se recomienda en cada caso realizar los ensayos oportunos para determinar la dosificación óptima.

Limpieza de herramientas

La limpieza de equipos y herramientas que están impregnadas de POZZOLITH 390GV puede realizarse con agua preferentemente caliente.



Presentación

POZZOLITH 390GV se presenta a granel, en contenedores de 1000 kg, bidones de 220 kg y en garrafas de 25 kg.

Condiciones de almacenamiento/

Tiempo de conservación

Almacenar en lugar fresco y seco, con temperaturas superiores a 0° C y en sus envases originales herméticamente cerrados.

En estas condiciones el producto puede almacenarse hasta 12 meses.

Manipulación y transporte

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de seguridad del producto.

Hay que tener en cuenta

- Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con nuestro Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

Pozzolith 390GV Página 1 de 2



The Chemical Company

POZZOLITH 390GV

Propiedades	
Función principal:	Plastificante / Reductor de agua.
Efecto secundario:	Retraso de fraguado a dosis elevadas.
Aspecto físico:	Líquido marrón oscuro.
pH, 20° C:	5 ± 1
Densidad, 20° C:	1,210 ± 0,03 g/cm ³
Viscosidad Brookfield 20° C Sp00/100rpm:	< 90 cps
Contenido en cloruros:	< 0,1%
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	

NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición. BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición 28/06/2010

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

Pozzolith 390GV Página 2 de 2

**BASF Construction
Chemicals España, S.L.**
Basters, 15
08184 Palau-Solità i Plegamans
Tel.: 93 862 00 00 - Fax: 93 862 00 20
www.basf-cc.es • basf-cc@basf-cc.es

A.4.2 Aditivo superplastificante GLENIUM C303 SCC



The Chemical Company

GLENIUM C303 SCC

FT 1.1.49

Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad de altas prestaciones para hormigón autocompactante.

HAC - GLENIUM

El hormigón autocompactante HAC - GLENIUM es un hormigón capaz de recubrir cualquier parte y rincón del molde o encofrado a través del armado sin segregación ni indicios de bloqueo por la simple acción de su propio peso, sin la ayuda de ningún tipo de vibración u otro método de compactación, con excelentes acabados superficiales y elevadas resistencias mecánicas y durabilidad.

Campo de aplicación

- Hormigón autocompactante para prefabricado.
- Hormigones para pavimentos aplicados sin vibración.
- Rellenos de estructuras con dificultad de aplicar algún tipo de método de compactación.
- Hormigonado de estructuras de difícil vibración.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Propiedades

- Producción de hormigones autocompactantes de elevada calidad, baja R A/C y elevadas resistencias mecánicas.
- Elimina las operaciones de vibración para la puesta en obra.
- Incrementa la producción reduciendo los costes.
- Mejora el ambiente de trabajo.
- Acabados superficiales de elevada calidad sin necesidad de vibración.
- Incrementa la durabilidad de las piezas y estructuras.
- Apto para hormigón blanco.

Modo de utilización

GLENIUM C303 SCC debe adicionarse durante el proceso de fabricación del hormigón autocompactante, con la última parte del agua de amasado. Nunca debe adicionarse el aditivo sobre la masa seca de áridos y cemento.

GLENIUM C303 SCC puede utilizarse en combinación con el agente modulador de viscosidad GLENIUM STREAM 1A (ver ficha técnica 1.1.49) para mejorar la cohesión de la masa y la resistencia a la segregación.



Dosificación

La dosificación habitual de GLENIUM C303 SCC es de 0,9 – 2,5% sobre peso de ligante, en función de las características y dosificación de los materiales.

Dosificaciones superiores son posibles con ensayos previos.

En cualquier caso, se recomienda en cada caso realizar los ensayos oportunos para determinar la dosificación óptima.

Presentación

GLENIUM C303 SCC se presenta a granel, en contenedores de 1000 kg, bidones de 200 kg y en garrafas de 25 kg.

Limpieza de equipos

La limpieza de equipos y herramientas que están sucias de GLENIUM C303 SCC puede realizarse con agua preferentemente caliente.

Condiciones de almacenamiento/

Tiempo de conservación

Almacenar en lugar fresco y seco y en sus envases originales herméticamente cerrados, evitando temperaturas extremas. Si se congela, descongelar a +30° C aproximadamente y agitar hasta la completa reconstitución.

En estas condiciones GLENIUM C303 SCC puede almacenarse hasta 12 meses.



The Chemical Company

GLENIUM C303 SCC

Manipulación y transporte

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos por ejemplo usar gafas y guantes. No comer, beber ni fumar durante la aplicación. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información consultar la Hoja de Seguridad del producto.

Hay que tener en cuenta

- Se recomienda siempre la realización de ensayos previos a la utilización del aditivo.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con el Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

Propiedades	
Función principal:	Reductor de agua de alta actividad / Superplastificante.
Función secundaria:	Retenedor de agua.
Efecto secundario:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas.
Aspecto físico:	Líquido verdoso.
Densidad, 20° C:	1,035 ± 0,02 g/cm ³
pH, 20° C:	6 ± 1
Contenido en cloruros:	≤ 0,1 %
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm:	< 60 cps.
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	

NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición. BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada. Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

Edición 06/04/2010

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCION DE LA UNION EUROPEA

Glenium C303 SCC Página 2 de 2

**BASF Construction
Chemicals España, S.L.**

Basters, 15

08184 Palau-Solità i Plegamans

Tel.: 93 862 00 00 - Fax: 93 862 00 20

www.basf-cc.es • basf-cc@basf-cc.es

ANEJO B CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS DE PROBETAS Y TESTIGOS

B.1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se presentan los resultados relativos a las probetas moldeadas durante las campañas en planta y del laboratorio LTE Luis Agulló, así como los obtenidos posteriormente con las probetas-testigos de los batches.

En primer lugar, se presenta el registro fotográfico realizado tras verificar la consistencia de las amasadas por medio del ensayo de extensión de flujo (apartado B.2). A continuación, se detalla la caracterización llevada a cabo sobre las probetas-testigo obtenidas de la fragmentación de los TCZ (apartado B.3). Por último, se detallan los resultados del ensayo para la determinación de la porosidad y densidad de las muestras (apartado B.4), del ensayo de flexión sobre los testigos prismáticos (apartado B.5) y del método inductivo (apartado B.6).

B.2 ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO

B.2.1 Campaña en planta UNILAND

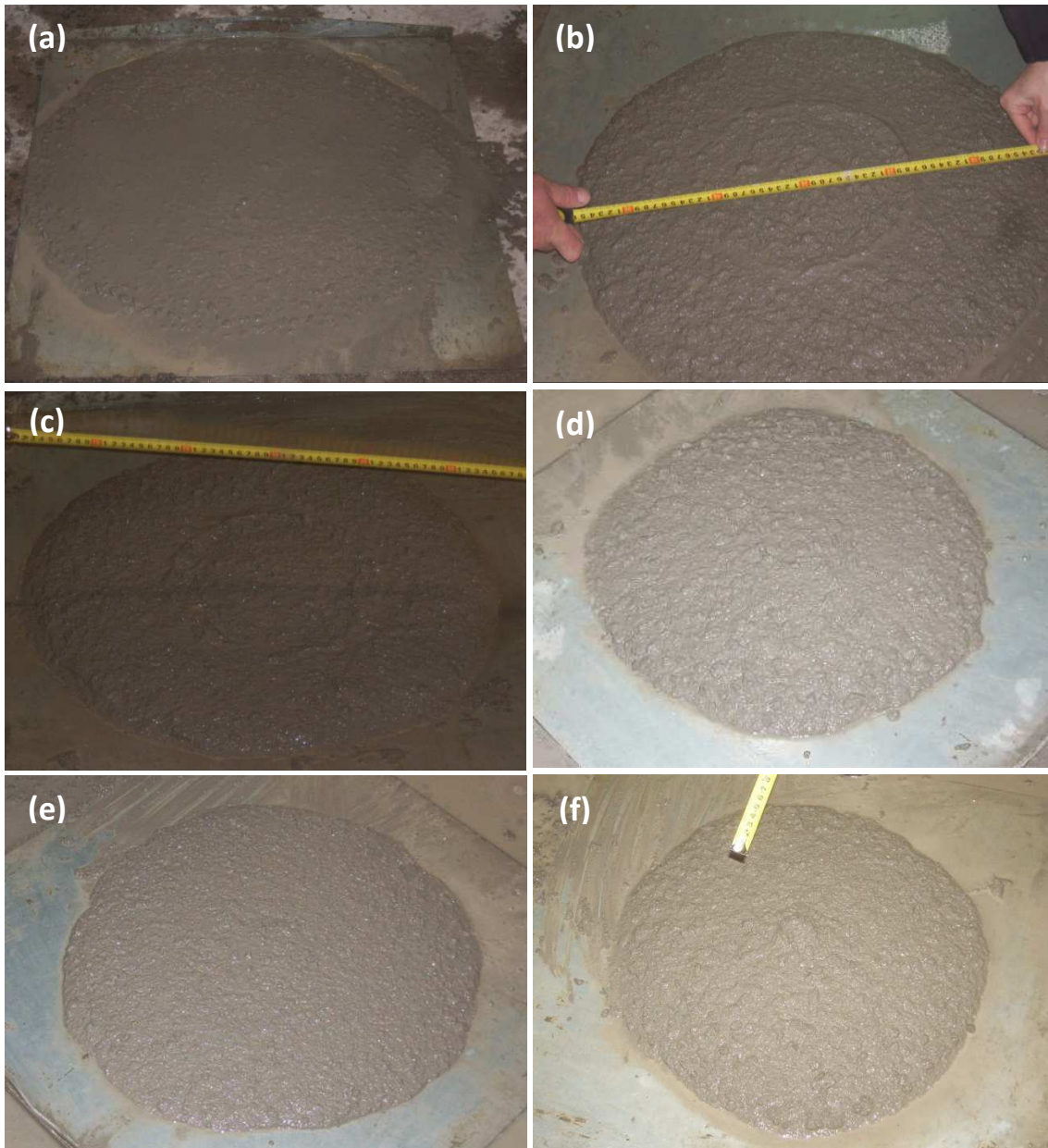


Figura B2.1. Ensayo de extensión de flujo en planta UNILAND. a) HM/AC12, b) HRM/AC12, c) HRM/AC20, d) HRM/AC20+I, e) HRF/AC12-35b, f) HRF/AC20-50

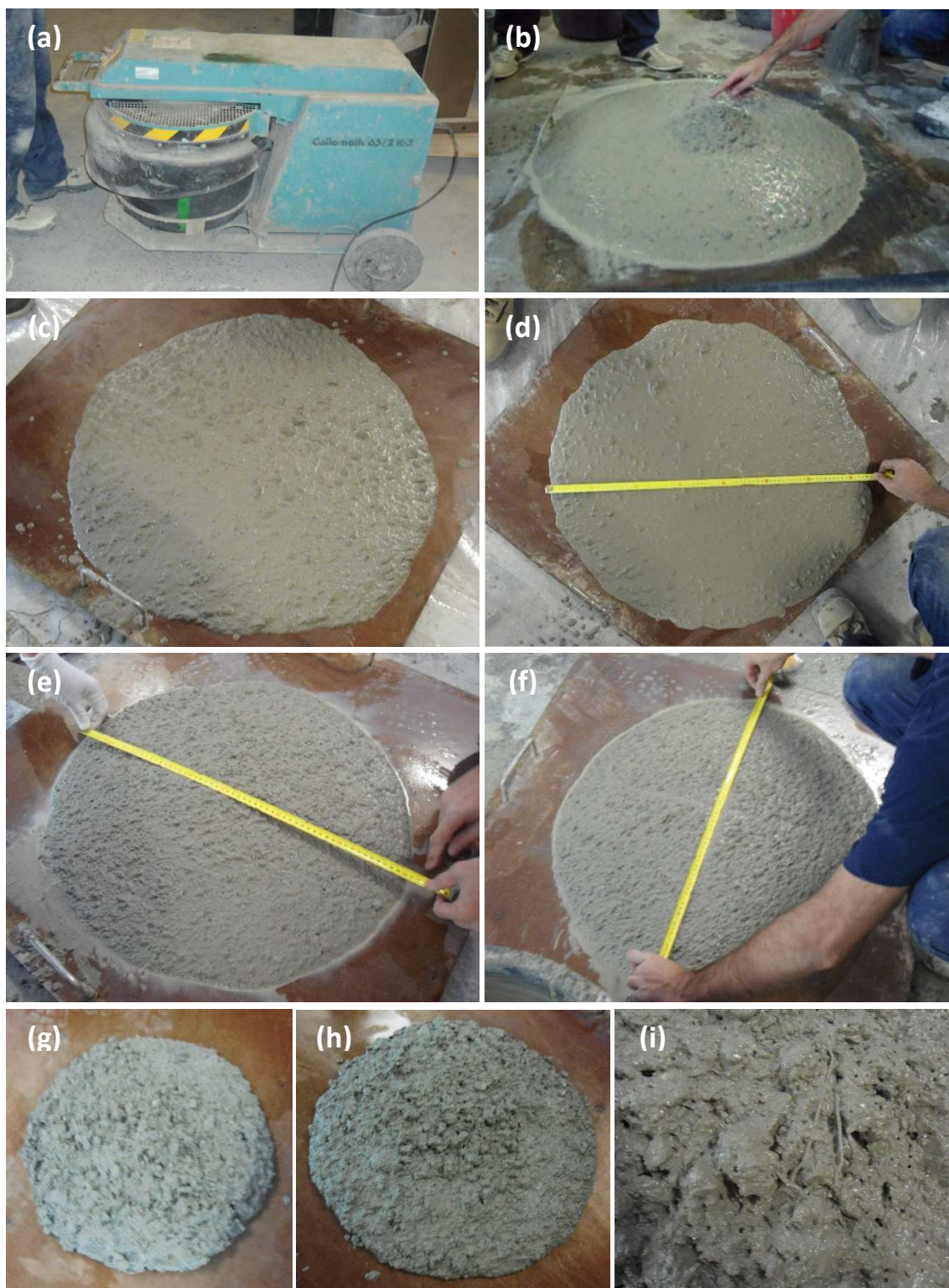
B.2.2 Campaña en LTE Luis Agulló

Figura B2.2. Ensayo de extensión de flujo LTE Luis Agulló. a) Amasadora COLLOMATIC, b) HRM/AC12, c) HRM/AC20, d) HRM/AC20+I, e) HRF/AC12-35a (1ª amasada), f) HRF/AC12-35b (2ª amasada), g) HRF/AC20-50 (1ª amasada), h) HRF/AC20-50 (2ª amasada), i) Detalle

B.3 CARACTERIZACIÓN PROBETAS-TESTIGO (extraídas de los TCZ)

B.3.1 Batache #1 (dosificación HRM/AC20)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	1101	91,3	186,4	2,564	4083	0,186
	1102	91,5	194,5	2,677	4104	0,381
	1103	91,1	54,7	0,745	-	-
	1104	91,4	190,8	2,656	4117	0,626
	1105	91,6	196,7	2,734	4203	0,823
	1106	91,6	182,1	2,538	4015	1,005
	1107	91,4	190,4	2,663	4372	1,196
	1108	91,3	186,9	2,626	4277	1,383
	1109	91,4	174,1	2,431	4151	1,557
	1110	91,6	93,5	1,302	-	-
	1111	91,6	191,0	2,678	4301	1,841
	1112	91,5	185,8	2,610	4189	2,027
	1113	91,4	198,3	2,781	4237	2,225
	1114	91,5	118,4	1,679	4338	2,344
TCZ 2	1201	91,5	194,4	2,694	4005	0,194
	1202	91,7	190,8	2,637	4030	0,385
	1203	91,5	200,7	2,673	4266	0,586
	1204	91,4	196,8	2,745	4178	0,783
	1205	91,7	204,8	2,850	4015	0,988
	1206	91,5	190,5	2,662	4045	1,178
	1207	91,6	140,4	1,955	4153	1,318
	1208	91,5	95,0	1,302	-	-
	1209	91,5	107,0	1,478	-	-
	1210	91,5	162,8	2,290	4279	1,481
	1211	91,6	190,8	2,696	4078	1,672
	1212	91,5	57,0	0,786	-	-
	1213	91,6	163,9	2,309	4241	1,836
	1214	91,5	154,6	2,176	3930	1,991

Tabla B3.1. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HRM/AC20 (Batache #1)

B.3.2 Batache #2 (dosificación HRF/AC12-35b)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	2101	91,6	199,3	2,784	3987	0,199
	2102	91,5	198,7	2,764	4089	0,398
	2103	91,3	190,4	2,653	4008	0,588
	2104	91,4	194,4	2,718	4217	0,783
	2105	91,3	50,0	0,620	-	-
	2106	91,5	194,5	2,716	4237	1,027
	2107	91,5	194,6	2,709	4494	1,222
	2108	91,3	102,0	1,407	-	-
	2109	91,7	199,4	2,756	4172	1,523
	2110	91,6	194,5	2,660	4218	1,718
	2111	91,6	197,1	2,677	4111	1,915
	2112	91,3	56,0	0,760	-	-
TCZ 2	2201	91,6	198,6	2,781	4208	0,199
	2202	91,5	206,4	2,873	4165	0,405
	2203	91,6	196,6	2,737	4156	0,602
	2204	91,5	189,2	2,626	3898	0,791
	2205	91,7	204,7	2,843	4156	0,995
	2206	91,6	159,3	2,206	4249	1,155
	2207	91,3	55,8	0,767	-	-
	2207'	91,5	108,2	1,496	4242	1,319
	2208	91,7	193,6	2,673	4107	1,512
	2208'	91,3	97,0	0,761	-	-
	2209	91,7	196,5	2,696	4145	1,806
	2210	91,6	190,7	2,599	4146	1,997
	2211	91,5	96,4	1,303	4035	2,093

Tabla B3.2. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HRF/AC12-35a (Batache #2)

B.3.3 Batache #3 – parte superficial (dosificación HRM/AC12)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	3101	91,5	197,6	2,732	4061	0,198
	3102	91,8	194,3	2,697	4081	0,392
	3103	91,5	67,0	0,934	-	-
	3104	91,7	195,8	2,702	4008	0,655
	3105	91,6	194,2	2,677	4066	0,849
	3106	0,0	60,0	1,528	-	-
TCZ 2	3201	91,9	194,5	2,693	4047	0,194
	3202	91,5	190,2	2,631	4144	0,385
	3203	91,4	202,9	0,292	-	-
	3204	91,6	196,5	2,701	4181	0,784

Tabla B3.3. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HRM/AC12 (Batache #3A)

B.3.4 Batache #3 – parte profunda (dosificación HM/AC12)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	3107	91,5	80,0	1,388	-	-
	3108	91,5	199,1	2,961	4582	1,188
	3109	91,4	54,0	0,785	-	-
	3110	91,5	157,7	2,328	4715	1,400
	3112	91,6	95,0	1,403	-	-
	3113	91,5	190,3	2,841	4721	1,685
	3114	91,6	108,9	1,640	4704	1,794
TCZ 2	3205	91,6	201,4	3,000	4635	0,985
	3206	91,5	208,3	3,115	4451	1,194
	3207	91,3	195,8	2,926	4332	1,390
	3208	91,2	75,0	1,116	-	-
	3209	91,7	195,9	2,926	4338	1,660
	3210	91,4	194,7	2,895	4297	1,855
	3211	91,4	90,8	1,349	-	-
	3212	91,4	199,0	2,959	4527	2,145

Tabla B3.4. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HM/AC12 (Batache #3B)

B.3.5 Batache #4 (dosificación HRM/AC20+I)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	4101	91,4	189,4	2,553	4135	0,189
	4102	91,7	198,2	2,717	4281	0,388
	4103	91,2	44,9	0,610	-	-
	4104	91,7	174,8	2,427	4326	0,607
	4105	91,7	149,1	2,078	4365	0,756
	4106	91,7	171,4	2,351	4333	0,928
	4107	91,5	178,1	2,478	4333	1,106
	4108	91,4	205,4	2,864	4310	1,311
	4109	91,4	199,1	2,780	4306	1,510
	4110	91,3	198,7	2,779	4311	1,709
	4111	91,6	191,3	2,672	4289	1,900
	4111'	91,7	34,3	0,480	-	-
	4112	91,4	40,0	0,965	-	-
TCZ 2	4200	91,0	35,0	0,442	-	-
	4201	91,1	187,3	2,472	4089	0,222
	4202	91,3	198,4	2,698	4208	0,421
	4203	91,3	191,5	2,625	4231	0,612
	4204	91,3	198,5	2,749	4214	0,811
	4205	90,9	193,7	2,690	4229	1,004
	4206	91,2	197,6	2,737	4213	1,202
	4207	91,3	140,4	1,950	4407	1,342
	4208	91,4	198,9	2,757	4237	1,541
	4209	91,3	193,8	2,672	4208	1,735
	4210	91,4	193,8	2,654	4132	1,929
	4211	91,3	130,8	1,805	4240	2,060
	4212	91,4	132,3	1,844	4166	2,192

Tabla B3.5. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HRM/AC20+I (Batache #4)

B.3.6 Batache #5 (dosificación HRF/AC12-35a)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	5100	91,7	27,0	0,382	-	-
	5101	91,5	188,4	2,611	4017	0,215
	5102	91,5	198,0	2,721	3818	0,413
	5103	91,4	179,9	2,453	3804	0,593
	5104	91,5	191,6	2,624	3831	0,785
	5105	91,4	183,8	2,502	3837	0,969
	5106	91,3	58,4	0,796	-	-
	5107	91,4	96,2	1,314	-	-
	5108	91,5	162,8	2,223	3853	1,286
	5109	91,6	198,6	2,695	3794	1,485
	5110	91,5	156,3	2,119	3832	1,641
	5111	91,4	192,0	2,607	3806	1,833
	5112	91,6	194,6	2,661	3811	2,028
	5113	91,8	191,0	2,586	3840	2,219
5114	91,8	63,9	0,862	-	-	
TCZ 2	5201	91,6	197,9	2,727	3780	0,198
	5202	91,7	140,0	1,930	3831	0,338
	5203	91,5	194,0	2,669	3915	0,532
	5204	91,5	198,7	2,738	3855	0,731
	5205	91,9	49,1	0,670	-	-
	5205'	91,8	116,6	1,599	3849	0,896
	5206	91,4	136,8	1,869	3768	1,033
	5207	91,7	138,1	1,812	3863	1,171
	5208	91,5	103,0	1,374	-	-
	5209	91,5	182,9	2,504	3795	1,457
	5210	91,5	180,3	2,442	3815	1,637
	5211	91,4	31,0	0,415	-	-
	5212	90,7	59,3	0,795	-	-
	5213	91,5	162,1	2,161	3963	1,890

Tabla B3.6. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HRF/AC12-35a (Batache #5)

B.3.7 Batache #6 (dosificación HRF/AC20-50)

TCZ	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
TCZ 1	6100	91,4	30,0	0,458	-	0,000
	6101	91,3	195,8	2,798	4313	0,226
	6102	91,0	190,3	2,711	4385	0,416
	6103	91,3	106,7	1,528	-	-
	6104	91,5	179,9	2,550	4415	0,703
	6105	91,3	198,3	2,823	4441	0,901
	6106	91,3	128,6	1,823	4375	1,030
	6107	91,1	201,8	2,862	4436	1,232
	6108	91,4	189,4	2,660	4405	1,421
	6109	91,3	91,4	1,261	-	-
TCZ 2	6201	91,2	200,0	2,770	4273	0,200
	6202	91,2	197,4	2,760	4386	0,397
	6203	90,0	82,0	1,128	-	-
	6203'	91,2	126,9	1,793	4382	0,606
	6204	91,4	194,5	2,748	4411	0,801
	6205	91,5	194,4	2,747	4054	0,995
	6206	91,6	190,3	2,705	4452	1,185
	6207	91,5	203,9	2,901	4438	1,389
	6208	91,2	30,0	1,349	-	-

Tabla B3.7. Caracterización de probetas-testigo TCZ.
Dosificación HRF/AC20-50 (Batache #6)

B.4 RESULTADO ENSAYO UNE-EN 1936 (Porosidad – densidad)

B.4.1 Muestras procedentes de los TCZ

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	1103	54,7	0,770	0,419	0,715	2,034	13,06	15,59
	1110	93,5	1,340	0,733	1,253	2,058	11,96	14,44
TCZ 2	1208	0,0	1,347	0,738	1,256	2,057	12,34	14,94
	1209	0,0	1,524	0,839	1,425	2,076	11,80	14,45
	1212	0,0	0,812	0,450	0,757	2,092	12,08	15,06

Tabla B4.1. Dosificación HRM/AC20. Batache #1

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	2105	50,0	0,637	0,345	0,599	2,049	11,09	13,14
	2108	102,0	1,434	0,769	1,358	2,038	9,86	11,40
	2112	56,0	0,779	0,418	0,732	2,022	11,27	13,03
TCZ 2	2207	55,8	0,784	0,423	0,740	2,042	10,57	12,36
	2208'	97,0	0,778	0,417	0,734	2,030	10,60	12,26

Tabla B4.2. Dosificación HRF/AC12-35b. Batache #2

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	3103	67,0	0,967	0,495	0,897	1,897	14,10	14,80
	3106	60,0	1,595	0,855	1,470	1,983	14,65	16,94
TCZ 2	3203	202,9	0,310	0,168	0,280	1,965	17,94	21,18

Tabla B4.3. Dosificación HRM/AC12. Batache #3 (parte superficial)

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	3107	80,0	1,445	0,831	1,348	2,192	11,70	15,85
	3109	54,0	0,813	0,467	0,761	2,194	11,24	15,18
	3112	95,0	1,438	0,821	1,361	2,203	9,35	12,45
TCZ 2	3208	75,0	1,155	0,665	1,082	2,206	10,92	14,83
	3211	90,8	1,381	0,791	1,306	2,209	9,50	12,73

Tabla B4.4. Dosificación HM/AC12. Batache #3 (parte profunda)

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	4103	44,9	0,620	0,329	0,583	1,997	11,28	12,74
	4111'	34,3	0,490	0,266	0,459	2,044	11,55	13,69
	4112	40,0	0,980	0,530	0,926	2,053	10,21	12,01
TCZ 2	4200	35,0	0,456	0,231	0,424	1,888	13,49	13,91

Tabla B4.5. Dosificación HRM/AC20+I. Batache #4

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	5100	27,0	0,397	0,216	0,364	2,006	15,46	18,47
	5106	58,4	0,824	0,443	0,759	1,986	14,81	17,21
	5107	96,2	1,356	0,728	1,252	1,989	14,23	16,48
	5114	63,9	0,891	0,476	0,823	1,978	14,31	16,40
TCZ 2	5205	49,1	0,692	0,373	0,634	1,989	15,30	17,94
	5208	103,0	1,412	0,755	1,303	1,979	14,42	16,56
	5211	31,0	0,432	0,231	0,395	1,966	15,79	18,19
	5212	59,3	0,819	0,435	0,755	1,963	14,69	16,65

Tabla B4.6. Dosificación HRF/AC12-35a. Batache #5

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCZ 1	6100	30.0	0.468	0.261	0.437	2.106	11.74	14.76
	6103	106.7	1.548	0.855	1.466	2.111	9.58	11.82
	6109	91.4	1.280	0.695	1.208	2.062	10.33	12.28
TCZ 2	6203	82.0	1.146	0.630	1.085	2.098	9.73	11.88
	6208	30.0	0.000	0.765	1.298	2.040	13.39	16.15

Tabla B4.7. Dosificación HRF/AC20-50. Batache #6

B.4.2 Muestras procedentes de los TCY

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	1110	43,46	0,631	0,346	0,580	2,030	14,80	17,96
	1120	62,55	0,904	0,498	0,835	2,054	13,76	16,88
	1123	104,23	1,493	0,815	1,391	2,046	12,52	15,03
	1130	31,18	0,453	0,253	0,417	2,087	14,02	17,79
	1134	54,73	0,789	0,437	0,728	2,065	13,98	17,36
	1210	44,50	0,650	0,354	0,593	2,001	15,96	19,09
	1214	76,92	1,110	0,603	1,021	2,009	14,77	17,55
	1220	39,94	0,594	0,391	0,532	-	-	-
	1224	62,12	0,895	0,491	0,828	2,048	13,64	16,62
	1230	43,94	0,638	0,356	0,588	2,076	14,20	17,88
	1233	34,05	0,502	0,275	0,454	1,997	17,30	20,93
	1300	64,15	0,930	0,514	0,853	2,046	15,01	18,54
	1301	21,42	0,310	0,169	0,286	2,032	14,01	16,87
	1312	36,97	0,539	0,295	0,493	2,013	15,73	18,99
	1315	54,01	0,780	0,424	0,716	2,008	15,13	18,04

Tabla B4.8. Dosificación HRM/AC20. Batache #1

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	2110	26,16	0,383	0,207	0,350	1,973	16,41	19,17
	2120	47,15	0,679	0,368	0,630	2,026	13,12	15,56
	2124	49,67	0,712	0,387	0,664	2,041	12,40	14,80
	2134	88,38	1,249	0,675	1,183	2,060	9,73	11,46
	2210	28,08	0,406	0,222	0,375	2,033	14,02	16,91
	2214	30,51	0,441	0,275	0,407	-	-	-
	2220'	26,61	0,386	0,210	0,356	2,015	14,35	17,07
	2220	37,36	0,539	0,291	0,499	2,013	13,53	15,93
	2223	49,31	0,703	0,378	0,658	2,020	11,91	13,85
	2230	61,13	0,869	0,470	0,819	2,050	10,55	12,44
	2234	33,89	0,485	0,264	0,453	2,044	12,34	14,76
	2314	29,80	0,333	0,181	0,305	2,002	15,68	18,71
	2324	34,23	0,492	0,266	0,456	2,007	13,88	16,29
	2330	37,67	0,540	0,293	0,502	2,027	12,79	15,12
	2334	26,71	0,383	0,205	0,357	2,007	12,76	14,78

Tabla B4.9. Dosificación HRF/AC12-35b. Batache #2

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	3110	29,59	0,449	0,243	0,396	1,914	22,00	25,90
	3120	28,33	0,412	0,236	0,379	2,144	14,15	18,93
	3130	33,87	0,493	0,281	0,454	2,141	13,80	18,34
	3134	31,91	0,464	0,266	0,428	2,156	13,55	18,19
	3220	30,20	0,440	0,251	0,405	2,136	14,24	18,94
	3223	40,16	0,602	0,347	0,539	2,107	18,19	24,73

Tabla B4.10. Dosificación HRM/AC12. Batache #3 (parte superior)

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	3313	35,46	0,517	0,284	0,471	2,018	16,27	19,85
	3320	16,23	0,234	0,135	0,218	2,194	11,87	16,15
	3322	41,81	0,577	0,333	0,560	2,288	-	-
	3325	35,74	0,519	0,297	0,478	2,148	13,81	18,46
	3331	119,92	1,704	0,980	1,610	2,218	9,63	13,02
	3333	73,12	1,038	0,597	0,983	2,225	9,18	12,42

Tabla B4.11. Dosificación HM/AC12. Batache #3 (parte inferior)

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	4114	51,98	0,740	0,390	0,693	1,977	11,95	13,32
	4120	47,31	0,672	0,368	0,634	2,081	10,31	12,47
	4124	34,28	0,490	0,264	0,455	2,008	13,36	15,61
	4130	27,67	0,401	0,219	0,370	2,034	14,22	17,21
	4134	26,14	0,373	0,204	0,347	2,053	12,77	15,47
	4210	44,81	0,638	0,346	0,601	2,052	10,70	12,65
	4214	50,85	0,724	0,387	0,679	2,012	11,60	13,34
	4220	33,99	0,490	0,266	0,452	2,017	14,04	16,67
	4224	29,30	0,418	0,227	0,390	2,030	12,62	14,93
	4234	22,29	0,320	0,176	0,298	2,060	12,74	15,54
	4310	33,89	0,489	0,263	0,452	1,993	14,12	16,39
	4314	28,89	0,422	0,226	0,385	1,959	16,36	18,85
	4320	26,77	0,386	0,210	0,357	2,024	13,82	16,49
	4324	34,15	0,489	0,265	0,455	2,021	12,93	15,22
	4330	24,35	0,350	0,191	0,325	2,043	13,18	15,90
	4334	21,18	0,306	0,166	0,282	2,015	14,60	17,42
4334	19,23	0,280	0,152	0,256	2,008	15,42	18,45	

Tabla B4.12. Dosificación HRM/AC20+I. Batache #4

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	5114	43,03	0,634	0,341	0,574	1,952	17,73	20,59
	5120	67,81	0,984	0,530	0,907	1,992	14,59	17,02
	5133	80,03	1,174	0,642	1,070	2,008	16,14	19,48
	5210	49,35	0,725	0,386	0,657	1,936	17,60	20,08
	5324	25,99	0,388	0,207	0,347	1,919	19,68	22,60
	5330	40,66	0,596	0,323	0,541	1,980	16,93	20,07
	5334	19,13	0,280	0,153	0,255	1,999	16,38	19,65

Tabla B4.13. Dosificación HRF/AC12-35a. Batache #5

Testigo	Probeta	h (mm)	Peso (kg)			Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)	
			P _{sss}	P _{sum}	P _{sec}		P _a	P _t
TCY	6114	55,68	0,794	0,436	0,743	2,067	11,82	14,36
	6120	67,68	0,962	0,531	0,908	2,102	10,15	12,50
	6124	81,53	1,150	0,634	1,089	2,103	9,75	11,97
	6130	30,33	0,433	0,243	0,406	2,131	11,23	14,35
	6134	39,53	0,566	0,314	0,527	2,088	12,42	15,49
	6210	37,70	0,541	0,297	0,503	2,054	12,84	15,60
	6220	37,87	0,551	0,303	0,506	2,034	14,90	18,19
	6224	58,77	0,841	0,464	0,787	2,085	11,63	14,34
	6310	67,26	0,965	0,529	0,900	2,059	12,41	15,07
	6320	27,07	0,397	0,217	0,363	2,019	15,59	18,90
	6324	39,08	0,575	0,307	0,520	1,931	18,13	20,69

Tabla B4.14. Dosificación HRF/AC20-50. Batache #6

B.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS TESTIGOS PRISMÁTICOS (TP)

B.5.1 Dimensiones de los TP

H1: Altura de la probeta extremo 1

H2: Altura de la probeta sección carga

H3: Altura de la probeta extremo 2

B1: Anchura de la probeta extremo 1

B2: Anchura de la probeta sección carga

B3: Anchura de la probeta extremo 2

E21: Longitud de la entalla lado frontal

E22: Longitud de la entalla eje

E23: Longitud de la entalla lado posterior

Dosificación	Testigo	H1	H2	H3	B1	B2	B3	E21	E22	E23
HRF/AC12-35b	2 · Sup	146,5	156,3	166,2	160,1	163,5	171,4	29,8	31,3	33,1
	2 ·· Sup	160,6	156,2	151,3	160,8	165,4	173,1	31,1	31,2	31,3
	2 · Int	163,5	160,1	156,3	164,4	168,1	171,3	34,7	36,7	38,7
	2 ·· Int	151,9	156,1	160,8	165,9	167,7	171,5	30,7	31,2	31,8
	2 · Prof	150,1	145,9	141,3	165,0	164,2	166,5	20,2	20,5	20,9
	2 ·· Prof	148,5	152,0	156,1	162,0	162,4	162,0	27,0	26,1	25,3
HRF/AC12-35a	5 · Sup	137,8	144,5	150,8	158,4	154,4	151,8	18,5	18,4	18,7
	5 ·· Sup	152,5	147,0	141,9	158,5	154,0	151,9	23,2	23,6	23,7
	5 · Int	145,6	146,0	146,5	155,7	152,8	151,0	21,1	21,8	21,9
	5 ·· Int	154,5	149,9	146,0	156,3	153,2	151,0	23,6	22,1	23,7
	5 · Prof	151,9	153,9	153,4	153,6	147,9	138,6	24,9	25,5	26,0
	5 ·· Prof	137,2	142,8	147,7	151,9	145,0	136,3	17,7	17,4	17,5
HRF/AC20-50	6 · Sup	151,0	151,2	150,4	136,3	126,0	115,4	25,7	26,6	25,4
	6 ·· Sup	159,0	161,1	163,7	137,1	126,3	115,2	36,2	37,8	40,2
	6 · Int	153,8	150,7	148,5	142,3	131,7	123,5	24,8	25,3	26,4
	6 ·· Int	140,7	143,6	146,4	142,9	132,4	123,5	16,8	16,3	15,9
	6 · Prof	152,6	151,4	150,8	144,4	133,7	123,0	24,9	25,5	25,8
	6 ·· Prof	147,6	149,5	150,6	145,6	135,0	123,9	21,5	22,3	23,3

Tabla B5.1. Dimensiones de los testigos prismáticos (TP)

B.5.2 Resultados del ensayo UNE-EN 14651:2007

Dosificación	Testigo	F_{LOP}	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	
HRF/AC12-35b	2 · Sup	2,30	0,23	0,13	0,09	0,08	
	2 ·· Sup	3,17	0,18	0,13	0,11	0,11	
	2 · Int	2,77	0,40	0,23	0,21	0,17	
	2 ·· Int	3,46	0,64	0,44	0,35	0,34	
	2 · Prof	3,35	0,82	0,66	0,55	0,47	
	2 ·· Prof	3,31	1,38	1,28	1,24	1,14	
HRF/AC12-35a	5 · Sup	2,24	0,52	0,33	0,31	0,30	
	5 ·· Sup	3,28	1,51	1,40	1,25	1,03	
	5 · Int	2,64	0,84	Caída del clip			
	5 ·· Int	2,31	0,52	0,30	0,29	0,24	
	5 · Prof	Rota antes del ensayo					
	5 ·· Prof	1,90	0,64	0,42	0,35	0,28	
HRF/AC20-50	6 · Sup	2,85	0,18	0	0	0	
	6 ·· Sup	3,25	0,33	0,13	0	0	
	6 · Int	3,69	0,13	0	0	0	
	6 ·· Int	3,87	0,44	0,34	0,30	0,27	
	6 · Prof	3,22	2,17	2,07	1,98	1,81	
	6 ·· Prof	3,20	1,32	1,29	1,28	1,19	

Tabla B5.2. Resultados del ensayo de flexión sobre los testigos prismáticos

B.6 RESULTADOS DEL MÉTODO INDUCTIVO

B.6.1 Calibración del método. Tipo de fibra.

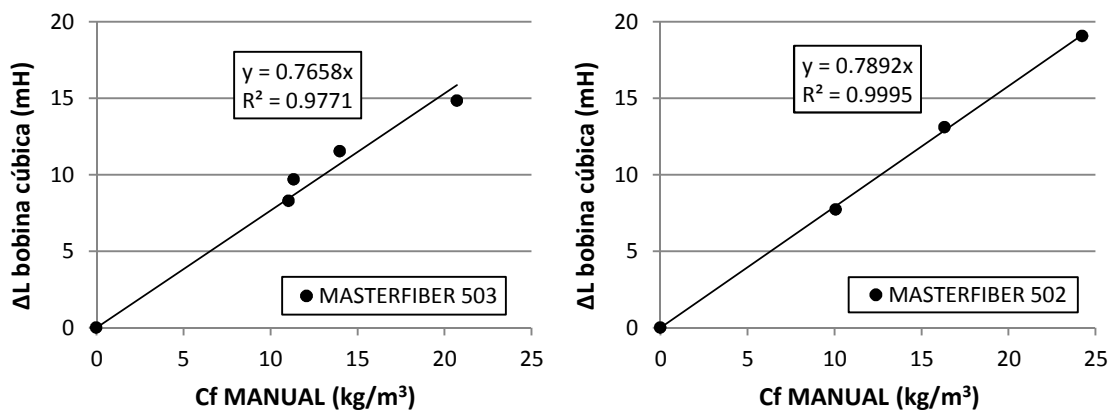


Figura B6.1. Correlación entre lecturas en bobina cúbica (ΔL) y contenido de fibras “real”.
a) Fibras M503, b) Fibras M502

B.6.2 Calibración del método. Tipo de bobina.

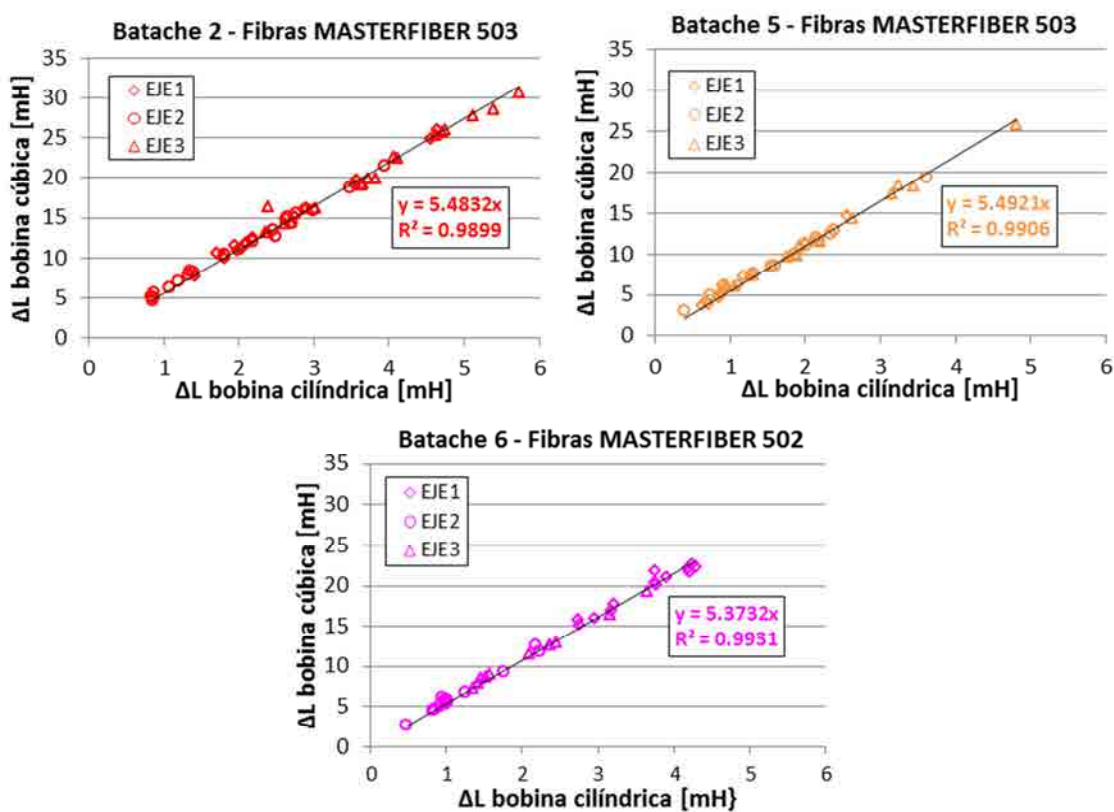


Figura B6.2. Correlación entre lecturas en bobina cúbica y bobina cilíndrica. a) y b) Fibras M503, c) Fibras M502

B.6.3 Resultados probetas moldeadas en planta

Dosificación	Probeta	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	% eje 1	% eje 2	% eje 3	C_f
HRF/AC12-35a	a	15,3	10,5	11,9	36,9	30,6	32,5	16,8
	b	15,2	12,9	13,0	35,1	32,4	32,5	18,3
HRF/AC12-35b	a	9,3	18,5	16,7	26,7	37,6	35,7	19,8
	b	8,4	14,0	13,6	28,1	36,2	35,7	16,0
	c	8,3	13,4	14,9	27,7	35,2	37,1	16,3
HRF/AC20-50	a	8,6	22,6	22,0	23,7	38,4	37,9	24,0
	b	11,3	29,5	25,7	24,2	39,2	36,6	30,1
	c	10,5	23,5	23,2	25,1	37,6	37,3	25,9

Tabla B6.1. Resultados del método inductivo (bobina cúbica).
Probetas moldeadas en planta

B.6.4 Resultados probetas moldeadas en LTE Luis Agulló

Dosificación	Probeta	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	% eje 1	% eje 2	% eje 3	C_f
HRF/AC12-35b	a	4,6	10,2	10,2	25,1	37,4	37,4	11,1
	b	14,1	25,1	27,6	26,8	35,7	37,5	29,8
	c	4,0	11,4	10,7	23,1	39,0	37,8	11,6
	d	7,5	14,5	13,2	26,9	37,4	35,7	15,7
	e	5,0	11,5	8,4	26,2	39,8	34,0	11,1
HRF/AC20-50	a	6,0	24,5	24,6	19,8	40,0	40,1	24,9
	b	3,7	9,3	10,4	23,5	37,2	39,3	10,6
	c	6,1	18,0	22,1	21,6	37,2	41,2	20,9
	d	4,0	11,2	13,5	22,2	37,1	40,7	13,0
	e	2,9	8,4	11,9	21,2	36,0	42,8	10,5

Tabla B6.2. Resultados del método inductivo (bobina cúbica).
Probetas moldeadas en LTE Luis Agulló

B.6.5 Resultados probetas-testigo (cúbicas procedentes de los TP)

Dosificación	Probeta	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	% eje 1	% eje 2	% eje 3	C_f
HRF/AC12-35b	2 · R(A)	2,19	0,84	5,11	31,78	19,68	48,54	20,5
	γ	1,95	1,40	4,62	29,53	25,02	45,45	20,1
	2 · R(B)	3,54	3,48	2,69	34,93	34,63	30,45	22,2
	ξ	4,64	2,62	2,39	40,50	30,43	29,07	22,8
	2 · R(A)	1,80	0,87	4,71	30,19	20,99	48,83	17,1
	ρ	2,19	1,33	4,06	31,84	24,81	43,35	17,9
	2 · R(B)	2,90	3,94	3,02	31,39	36,58	32,03	22,7
	μ	4,55	1,81	2,39	42,45	26,78	30,77	21,0
	2 · A(A)	2,09	1,19	5,73	29,32	22,13	48,55	20,8
	2 · A(B)	1,71	2,77	4,75	25,38	32,31	42,31	22,4
	2 · A(A)	2,10	1,08	5,40	30,11	21,60	48,29	20,6
	2 · A(B)	2,87	2,19	3,65	33,32	29,11	37,58	19,9
	2 · V(A)	1,41	2,49	3,72	25,30	33,62	41,09	18,0
	χ	2,71	0,85	3,82	36,40	20,39	43,22	18,2
	2 · V(B)	2,03	2,64	2,36	31,07	35,43	33,50	18,0
	α	2,74	1,35	1,79	39,84	27,96	32,20	15,8
	2 · V(A)	1,80	2,45	3,63	27,88	32,53	39,59	19,4
	β	3,56	0,87	4,11	38,93	19,24	41,83	20,4
2 · V(B)	1,97	2,99	2,61	29,56	36,42	34,02	17,8	

Tabla B6.3. Resultados del método inductivo (bobina cilíndrica).
 Probetas-testigo (Batache #2)

Dosificación	Probeta	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	% eje 1	% eje 2	% eje 3	C_f
HRF/AC12-35a	5 · R(A)	0,88	1,61	1,76	26,55	35,91	37,54	10,7
	5 · R(B)	0,68	3,62	3,24	18,21	42,03	39,76	19,0
	5 · R(A)	0,92	2,15	1,27	27,00	41,28	31,72	11,1
	η	0,91	0,39	0,96	37,29	24,41	38,30	7,0
	5 · R(B)	0,64	2,38	3,16	19,42	37,44	43,14	15,6
	5 · A(A)	1,99	2,18	1,05	36,06	37,74	26,19	13,0
	δ	1,18	0,74	1,93	32,56	25,79	41,65	10,6
	5 · A(B)	0,88	1,32	4,81	21,92	26,84	51,24	17,4
	5 · A(A)	2,55	2,33	1,32	37,38	35,73	26,89	15,1
	5 · A(B)	0,71	1,56	3,45	21,34	31,63	47,03	13,9
	5 · V(A)	2,10	1,30	2,62	34,44	27,10	38,47	14,8
	5 · V(B)	1,11	2,02	1,81	27,58	37,20	35,22	12,5
	5 · V(A)	1,95	1,56	1,89	34,74	31,07	34,20	14,0
	5 · V(B)	0,85	1,86	2,20	24,46	36,19	39,35	12,9

Tabla B6.4. Resultados del método inductivo (bobina cilíndrica).
Probetas-testigo (Batache #5)

Dosificación	Probeta	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	% eje 1	% eje 2	% eje 3	C_f
HRF/AC20-50	6 · R(A)	2,96	0,91	3,64	37,55	20,82	41,64	19,5
	6 · R(A)	3,21	0,82	3,15	40,06	20,25	39,69	17,9
	6 · R(B)	2,74	0,47	1,35	47,26	19,57	33,17	13,2
	6 · A(A)	4,18	1,00	2,45	44,35	21,69	33,96	19,3
	ε	2,75	0,94	1,41	43,46	25,41	31,12	14,3
	6 · A(B)	3,17	1,02	1,52	44,25	25,10	30,64	16,3
	6 · A(A)	4,20	0,94	2,37	44,96	21,27	33,77	19,8
	6 · A(B)	3,75	1,25	1,57	44,96	25,96	29,09	19,5
	6 · V(A)	3,90	0,98	2,36	43,88	21,99	34,13	17,9
	Ω	3,74	2,18	1,45	41,91	32,00	26,09	20,5
	6 · V(B)	4,29	1,76	0,97	47,26	30,27	22,47	19,0
	6 · V(A)	3,76	1,01	2,09	44,17	22,89	32,93	17,8

Tabla B6.5. Resultados del método inductivo (bobina cilíndrica).
Probetas-testigo (Batache #6)

B.6.6 Resultados probetas-testigo (Cilíndricas procedentes de los TCZ)

Dosificación	Probeta	ΔL_z	ΔL_{45}	ΔL_0	ΔL_{45}	ΔL_{TOT}	% eje z	C_f
HRF/AC12-35b	2102B	0,41	0,32	0,20	0,48	1,21	33,7	19,0
	2102C	0,52	0,54	0,27	0,64	1,70	32,0	26,1
	2107B	0,62	0,23	0,26	0,22	1,07	45,4	16,6
	2107C	0,70	0,34	0,29	0,36	1,40	41,4	22,1
	2110B	0,47	0,13	0,28	0,25	0,85	44,3	13,6
	2110C	0,64	0,23	0,32	0,35	1,22	42,8	19,0
	2202B	0,69	0,14	0,30	0,27	1,10	48,2	16,9
	2202C	0,73	0,24	0,23	0,13	1,10	50,1	17,1
	2206B	0,67	0,31	0,20	0,21	1,19	44,6	17,8
	2207'A	0,53	0,22	0,25	0,29	1,04	41,9	16,3
2211	0,21	0,57	0,61	0,79	1,57	21,8	22,1	
HRF/AC12-35a	5102A	0,36	0,35	0,31	0,25	0,96	35,5	15,1
	5102B	0,45	0,29	0,60	0,48	1,22	35,3	18,8
	5108A	0,26	0,45	0,43	0,36	1,07	28,6	16,2
	5110A	0,13	0,59	0,36	0,45	1,17	20,0	17,6
	5112A	0,15	0,42	0,61	0,68	1,25	20,8	19,6
	5112B	0,16	0,58	0,66	0,60	1,34	20,7	20,8
	5202B	0,25	0,42	0,50	0,38	1,05	28,3	15,9
	5205'B	0,64	0,40	0,36	0,33	1,37	39,9	21,3
	5206B	0,31	0,35	0,21	0,24	0,90	34,0	14,3
	5207B	0,40	0,41	0,39	0,54	1,35	31,5	20,4
5213A	0,28	0,13	0,58	0,39	0,80	34,9	12,1	
HRF/AC20-50	6102B	0,70	0,23	0,40	0,46	1,39	41,9	20,0
	6102C	0,65	0,18	0,41	0,49	1,32	41,8	19,6
	6106A	1,10	0,24	0,39	0,26	1,60	51,2	24,1
	6108B	0,91	0,19	0,16	0,16	1,26	53,3	19,3
	6108C	1,28	0,29	0,31	0,26	1,83	51,9	27,9
	6202B	0,56	0,23	0,28	0,15	0,94	46,3	14,7
	6202C	0,65	0,29	0,19	0,23	1,17	44,2	18,5
	6203'A	0,82	0,21	0,34	0,27	1,30	48,1	19,7
	6207A	1,11	0,22	0,39	0,42	1,75	48,5	26,6
6207C	1,01	0,15	0,48	0,24	1,40	53,4	21,2	

Tabla B6.6. Resultados del método inductivo (bobina cilíndrica).
 Probetas-testigo extraídas de los TCZ

ANEJO C CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DE LAS LOSAS

C.1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se presenta los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de las losas, concretamente los relativos a los diagrama carga – abertura de fisura (apartado C.2), mapa de fisuras (apartado C.3) y desplazamientos verticales (apartado C.4).

C.2 DIAGRAMAS CARGA - ABERTURA DE FISURA

C.2.1 Losas "C"

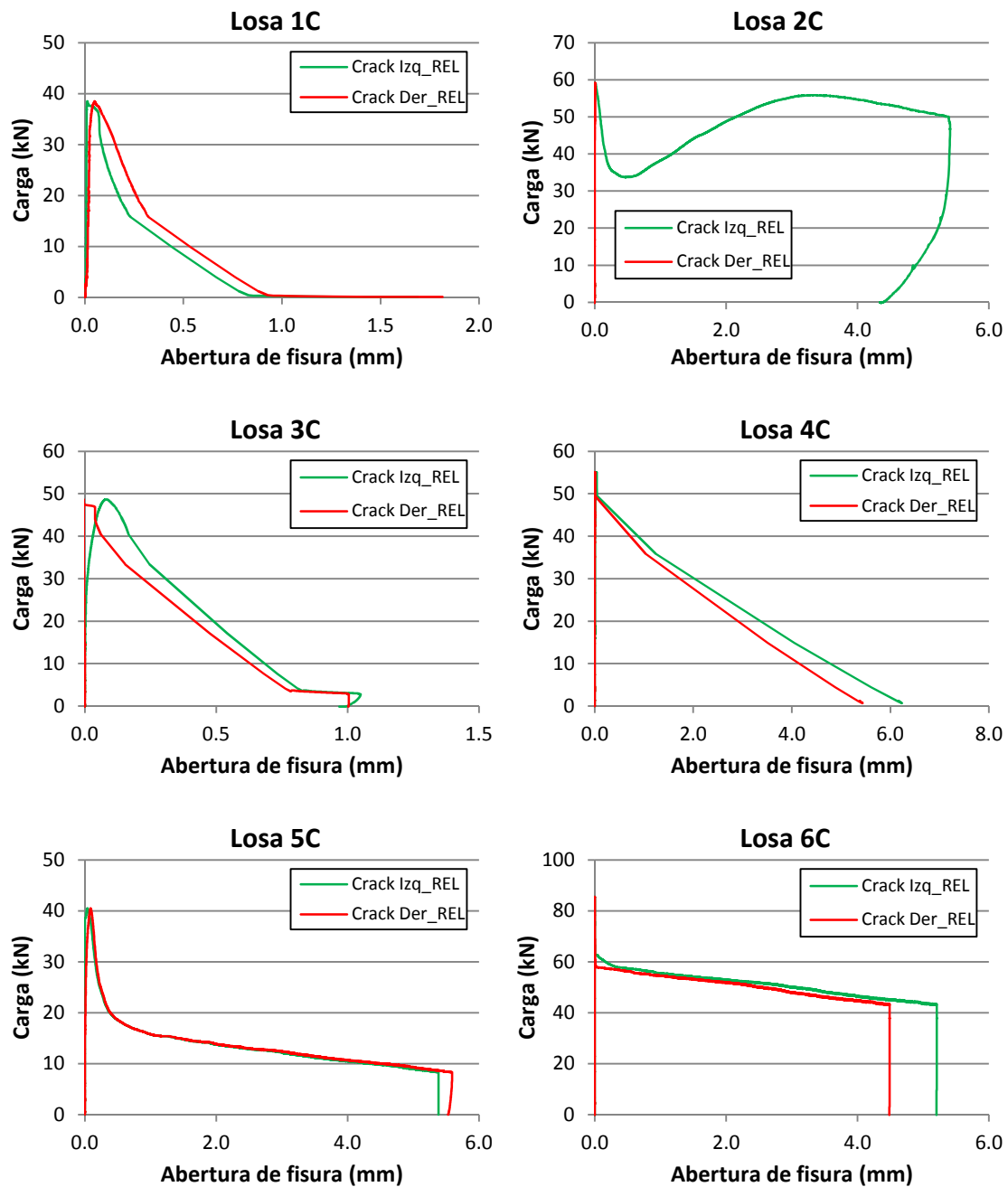


Figura C2.1. Diagrama F-w losas "C".
 a) Losa 1C, b) Losa 2C, c) Losa 3C, d) Losa 4C, e) Losa 5C, f) Losa 6C

C.2.2 Losas "S"

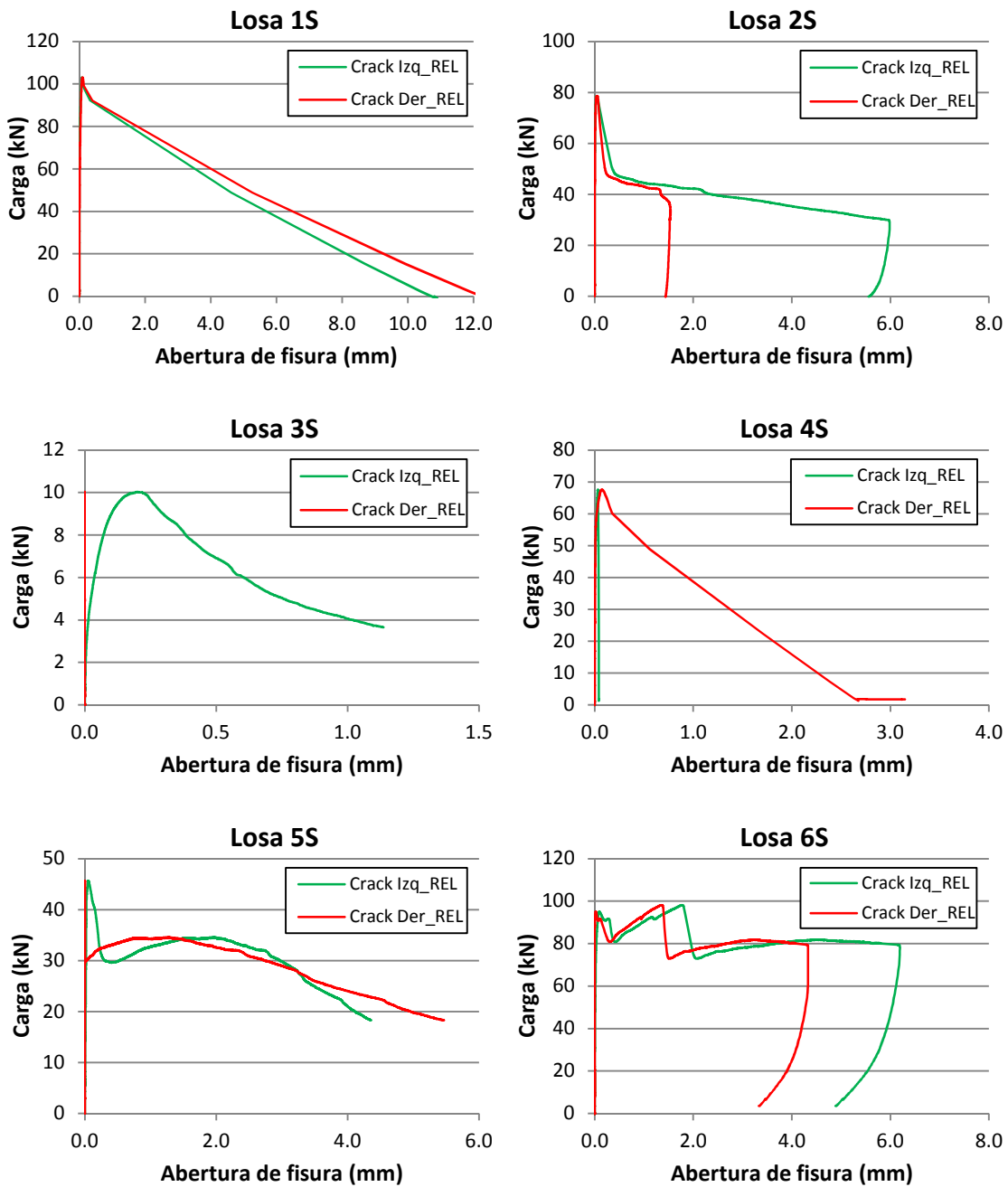


Figura C2.2. Diagrama F-w losas "S".
 a) Losa 1S, b) Losa 2S, c) Losa 3S, d) Losa 4S, e) Losa 5S, f) Losa 6S

C.2.3 Losas "I"

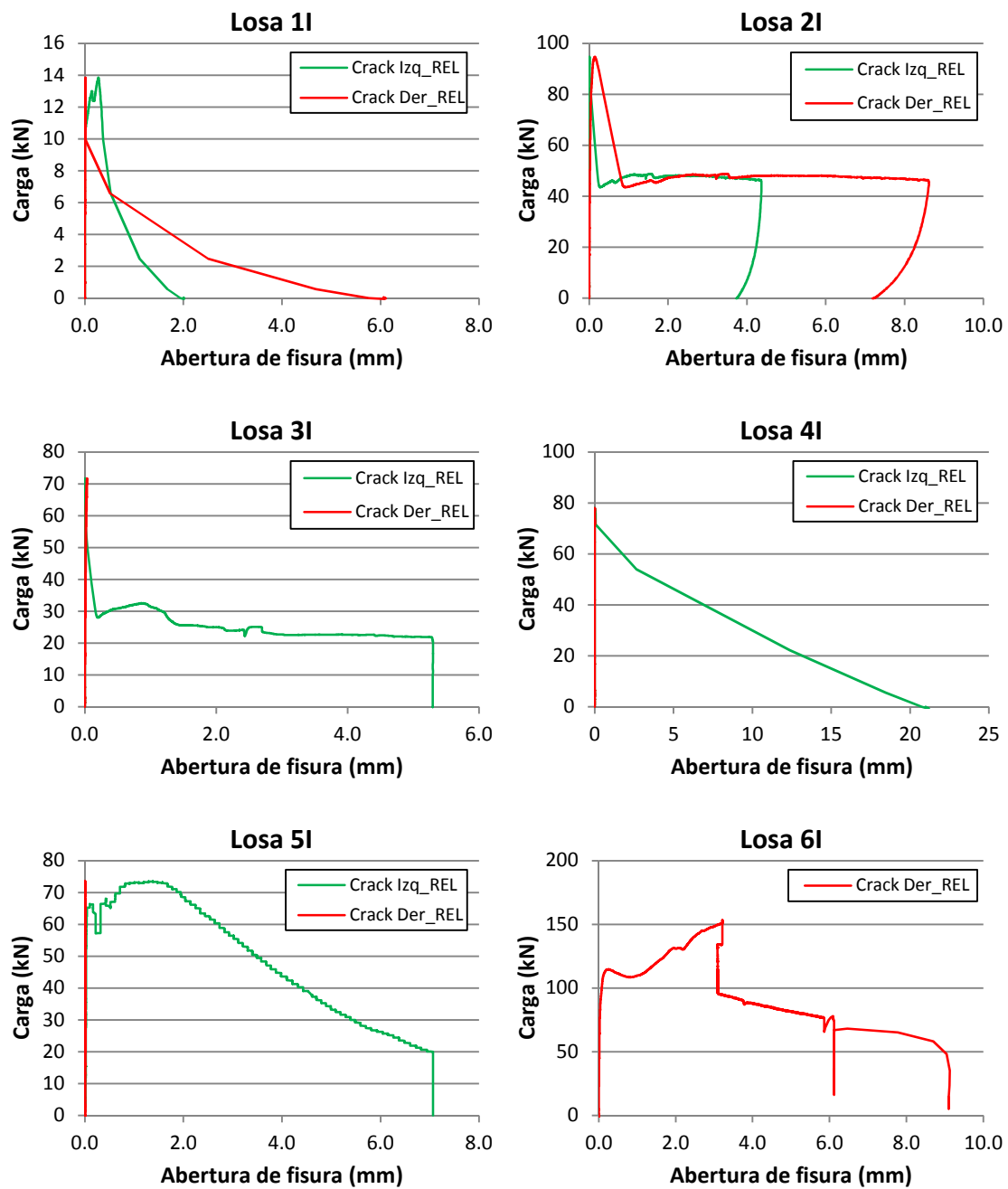


Figura C2.3. Diagrama F-w losas "I".
 a) Losa 1I, b) Losa 2I, c) Losa 3I, d) Losa 4I, e) Losa 5I, f) Losa 6I

C.3 MAPA DE FISURAS

C.3.1 Losas "C"

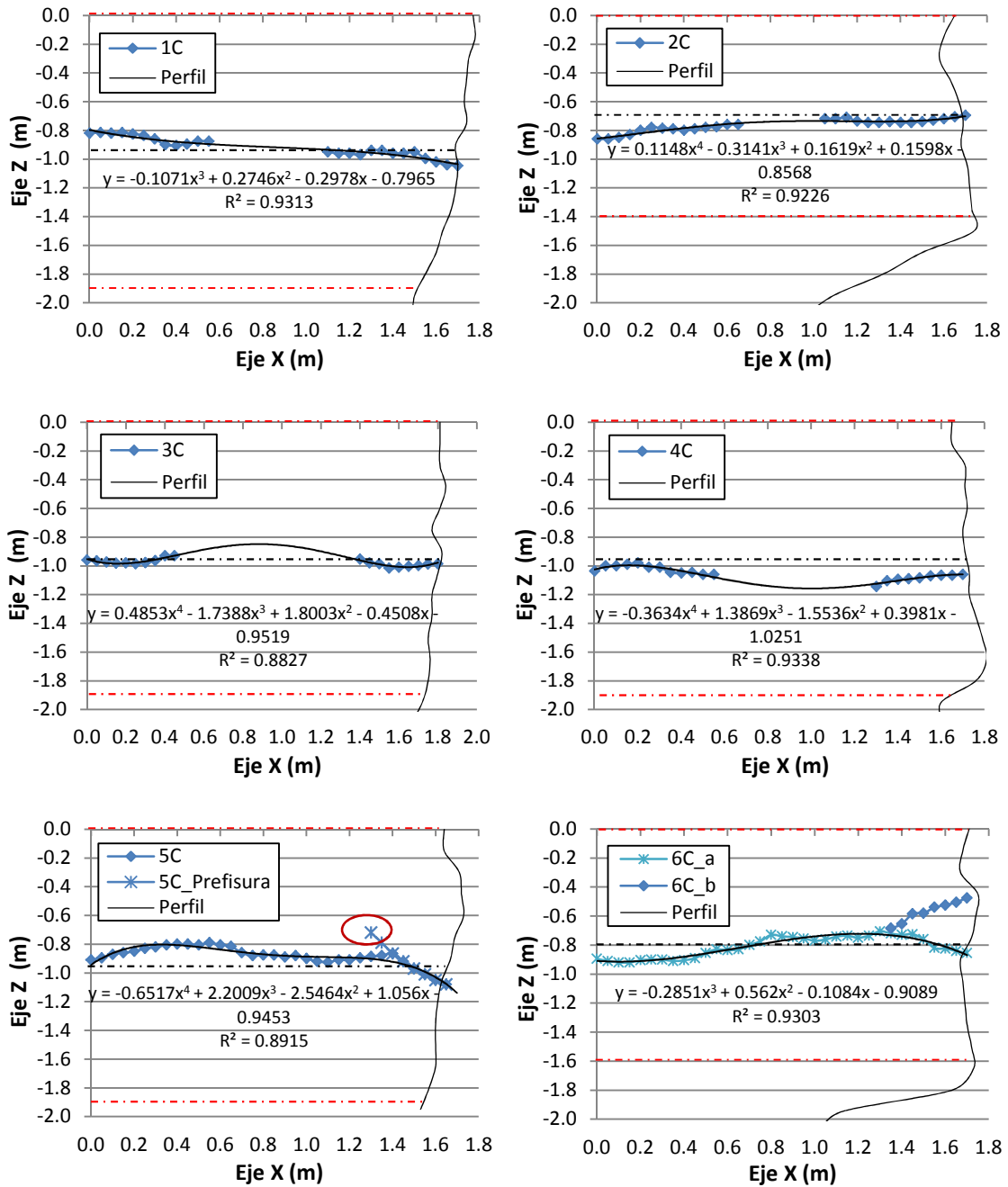


Figura C3.1. Mapa de fisuras losas "C".
 a) Losa 1C, b) Losa 2C, c) Losa 3C, d) Losa 4C, e) Losa 5C, f) Losa 6C

C.3.2 Losas "S"

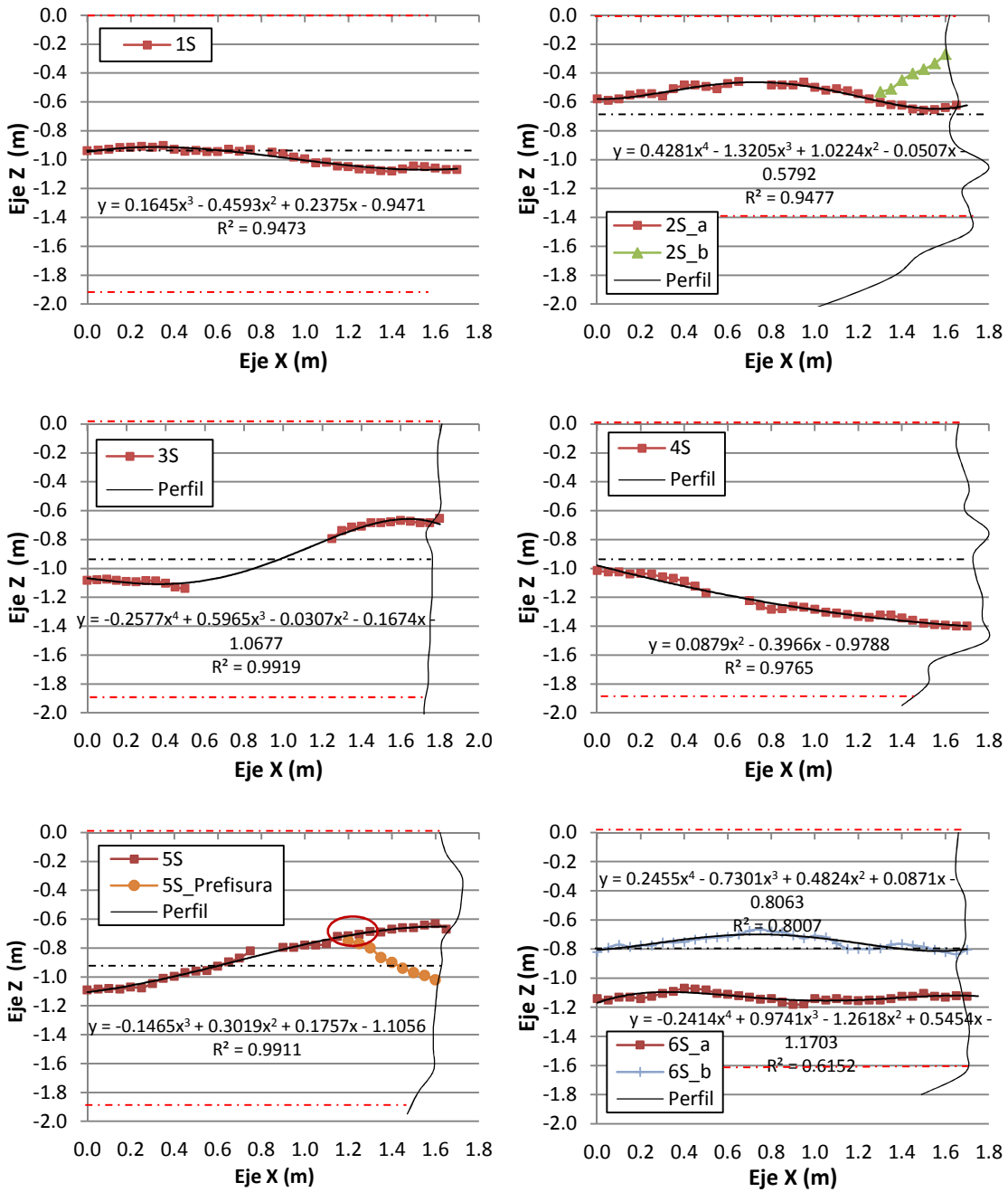


Figura C3.2. Mapa de fisuras losas "S".
 a) Losa 1S, b) Losa 2S, c) Losa 3S, d) Losa 4S, e) Losa 5S, f) Losa 6S

C.3.3 Losas "I"

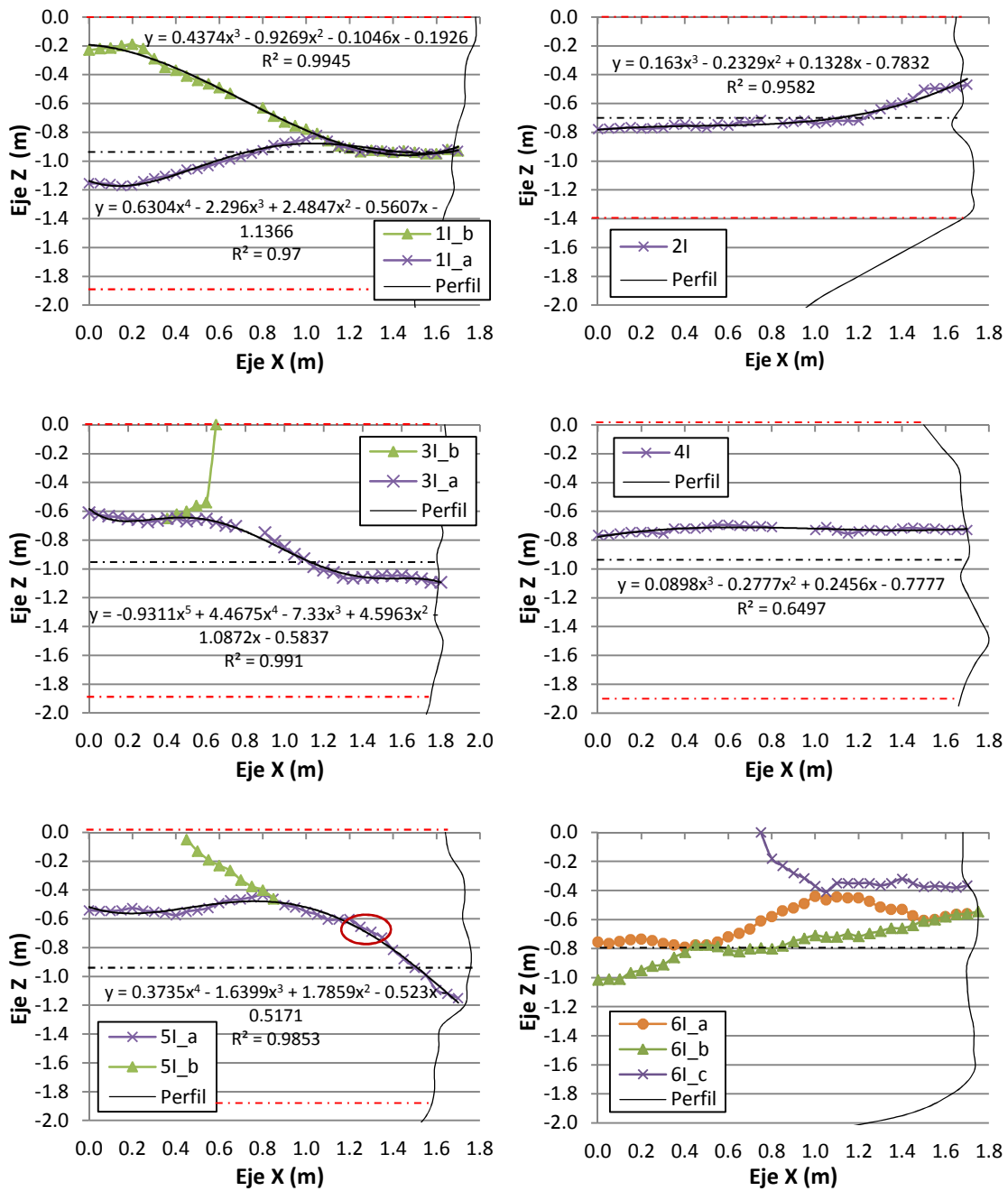


Figura C3.3. Mapa de fisuras losas "I".
 a) Losa 1I, b) Losa 2I, c) Losa 3I, d) Losa 4I, e) Losa 5I, f) Losa 6I

C.4 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES REGISTRADOS

C.4.1 Carga = carga de fisuración

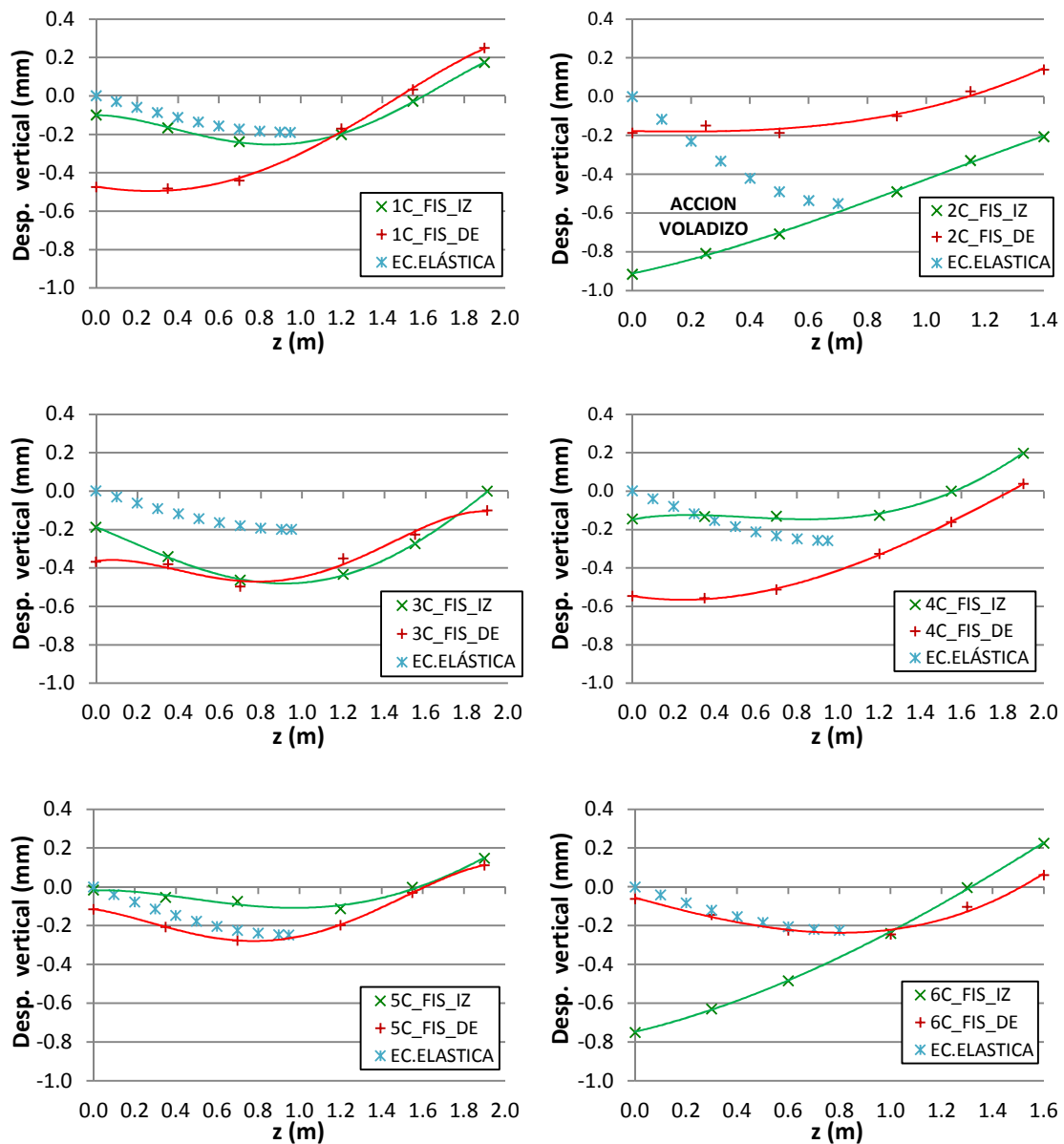


Figura C4.1. Desplazamientos verticales Losas "C". Carga = Carga de fisuración
 a) Losa 1C, b) Losa 2C, c) Losa 3C, d) Losa 4C, e) Losa 5C, f) Losa 6C

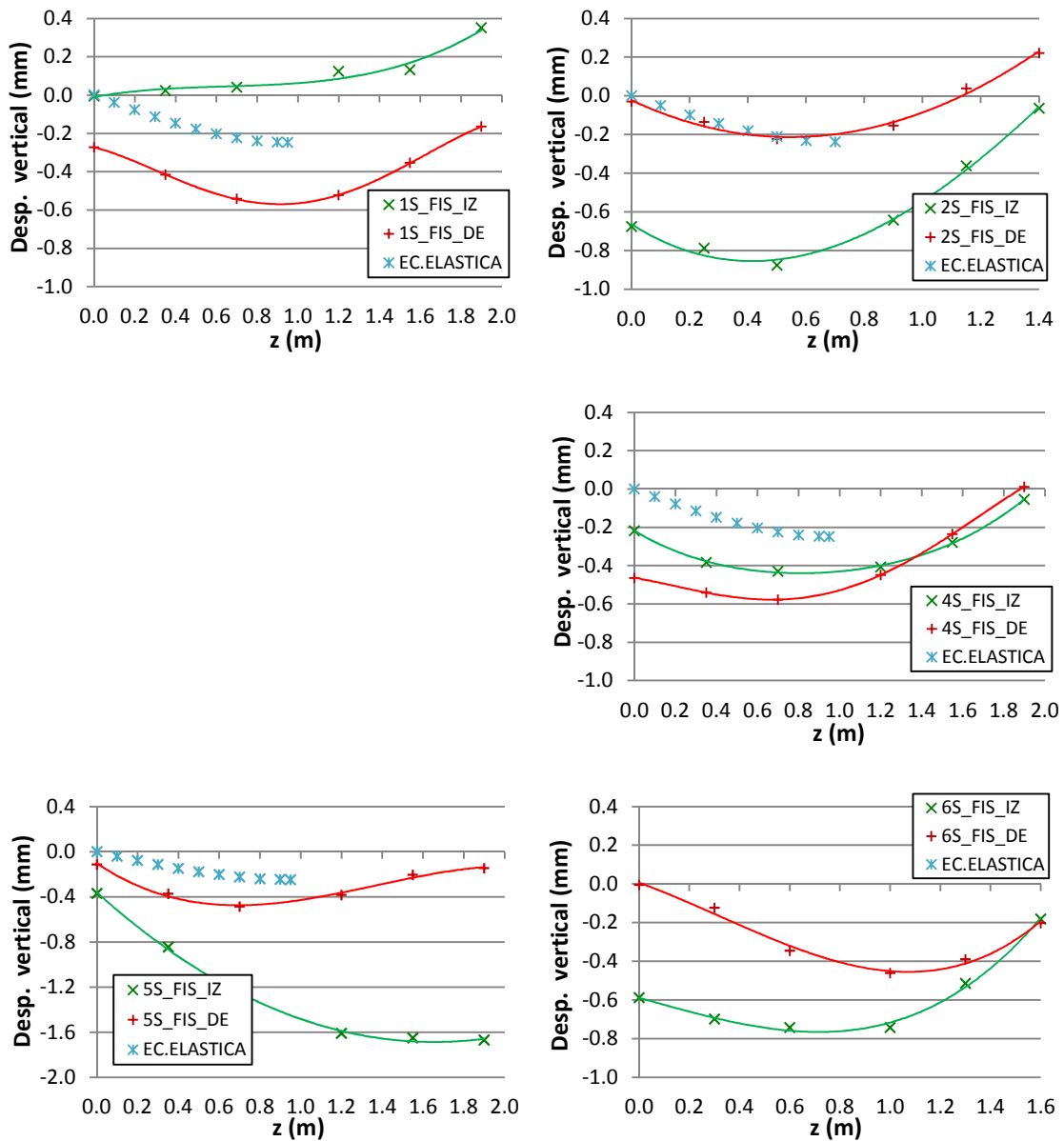


Figura C4.2. Desplazamientos verticales Losas "S". Carga = Carga de fisuración
 a) Losa 1S, b) Losa 2S, c) Losa 3S, d) Losa 4S, e) Losa 5S, f) Losa 6S

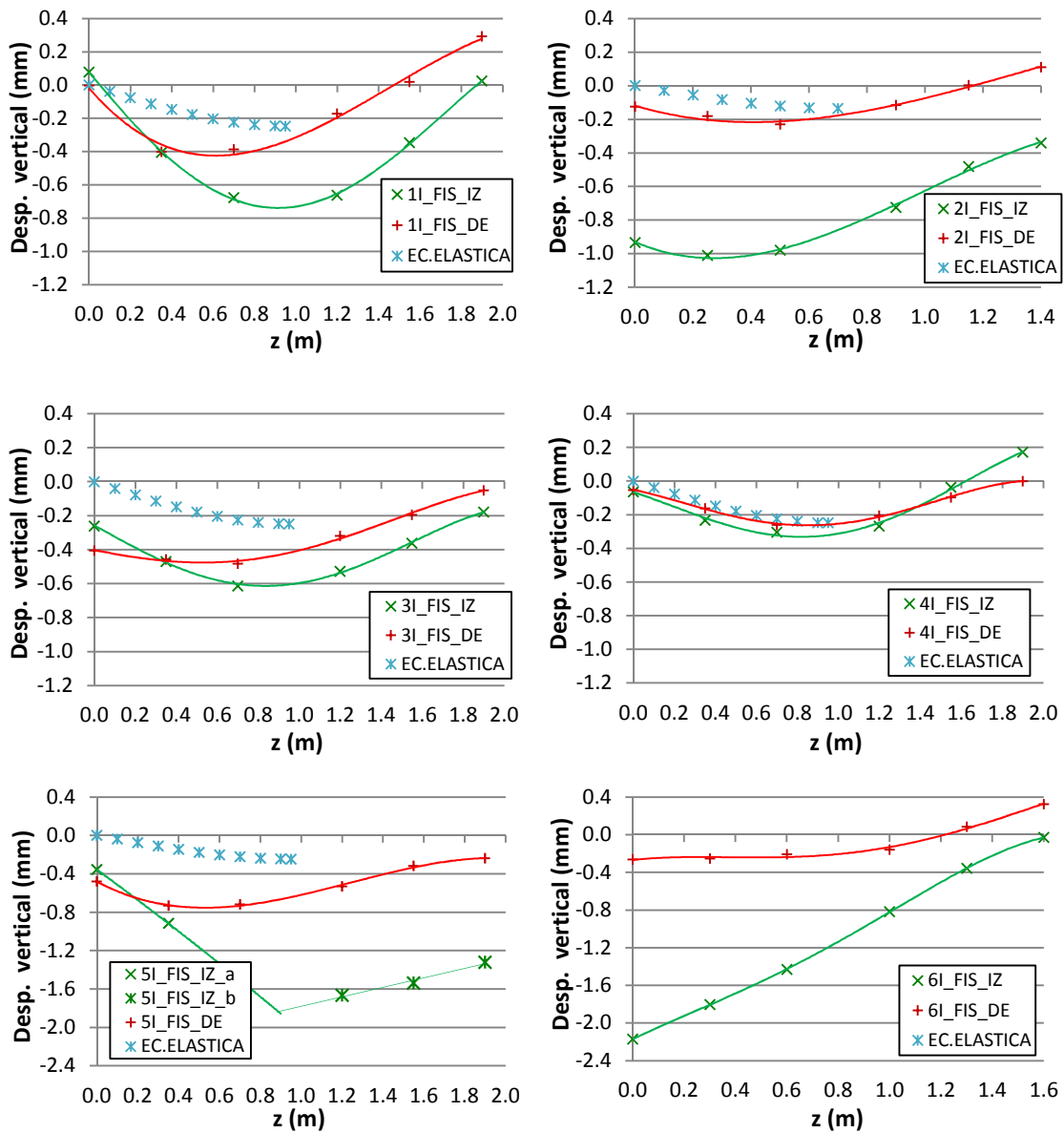


Figura C4.3. Desplazamientos verticales Losas "I". Carga = Carga de fisuración
 a) Losa 1I, b) Losa 2I, c) Losa 3I, d) Losa 4I, e) Losa 5I, f) Losa 6I

C.4.2 Carga = carga final de ensayo

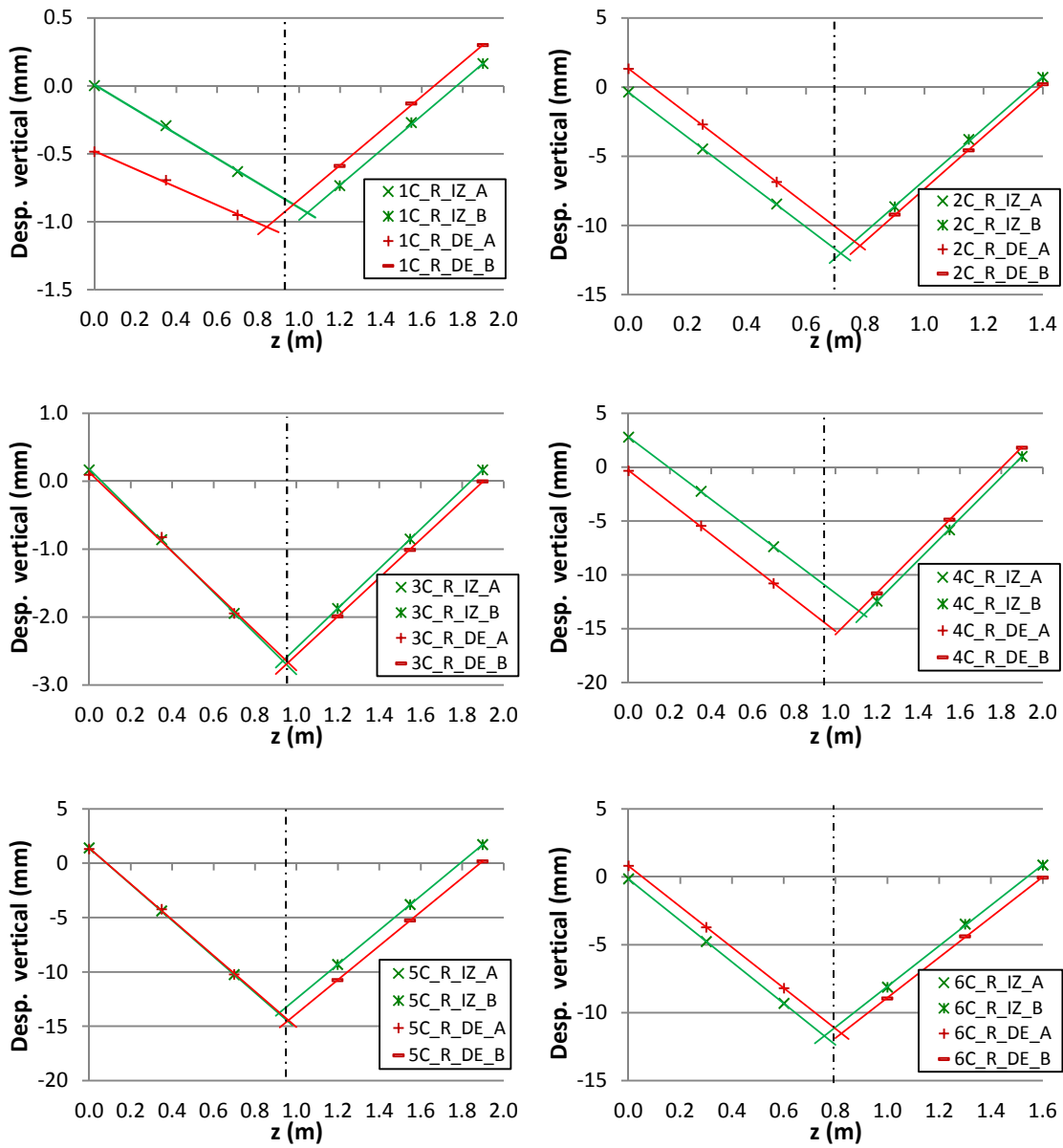


Figura C4.4. Desplazamientos verticales Losas "C". Carga = Carga fin de ensayo
 a) Losa 1C, b) Losa 2C, c) Losa 3C, d) Losa 4C e) Losa 5C, f) Losa 6C

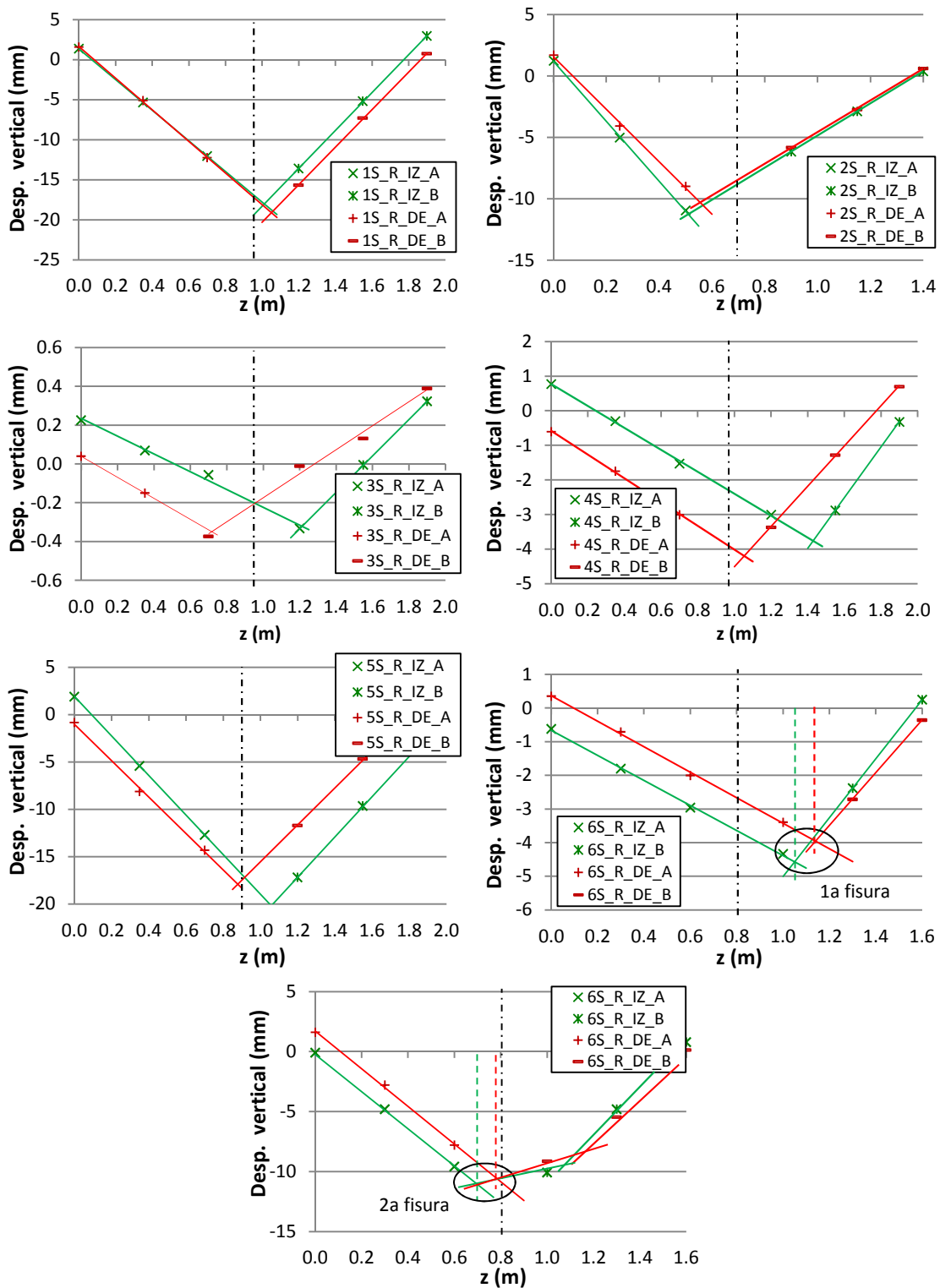


Figura C4.5. Desplazamientos verticales Losas "S". Carga = Carga fin de ensayo
 a) Losa 1S, b) Losa 2S, c) Losa 3S, d) Losa 4S e) Losa 5S, f) Losa 6S - 1ª fis, g) Losa 6S - 2ª fis

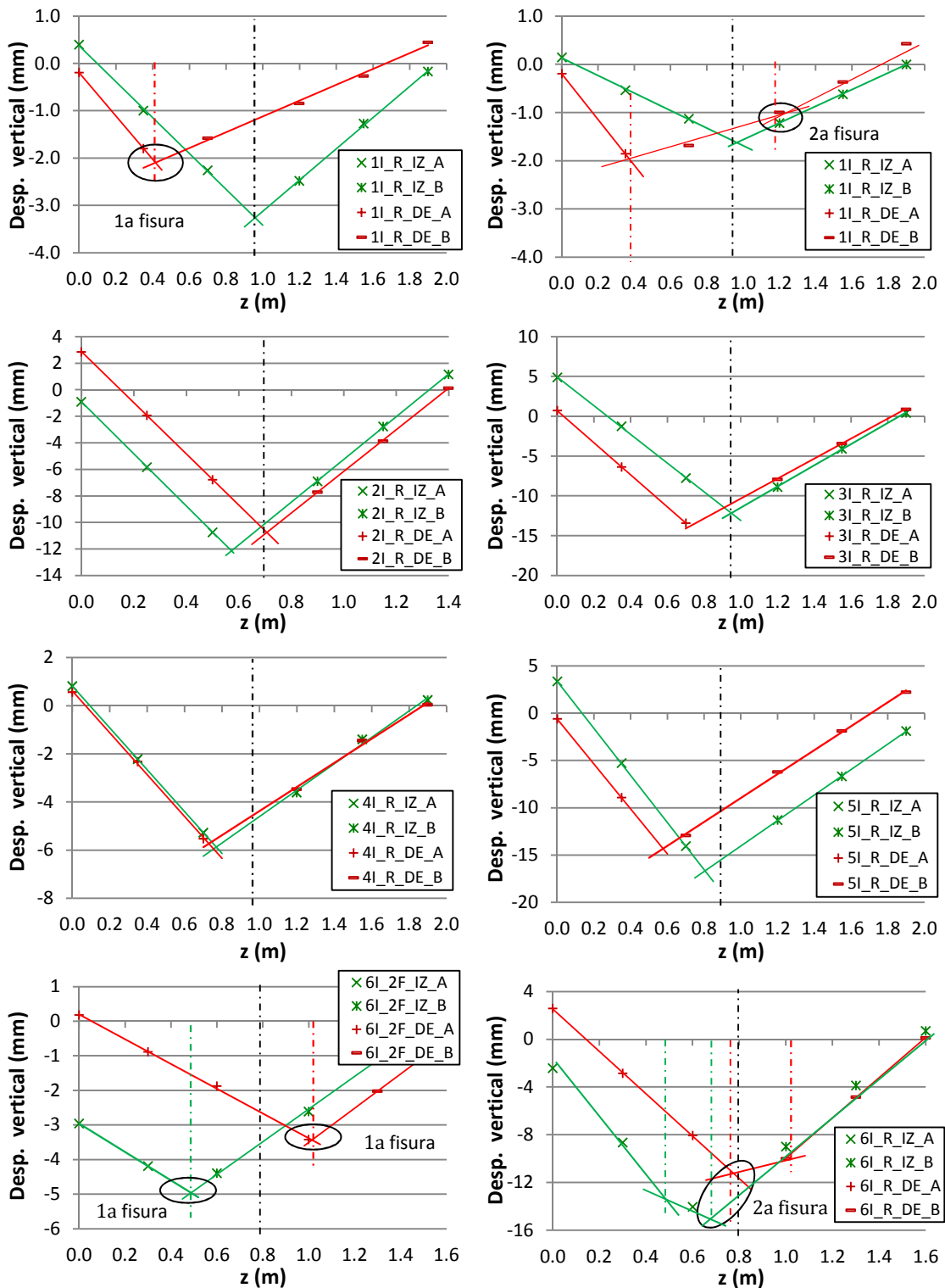


Figura C4.6. Desplazamientos verticales Losas "I". Carga = Carga fin de ensayo.
 a) Losa 1I - 1ª fis, b) Losa 1I - 2ª fis, c) Losa 2I, d) Losa 3I, e) Losa 4I, f) Losa 5I, g) Losa 6I - 1ª fis, h) Losa 6S - 2ª fis

ANEJO D

REGISTROS Y FOTOGRAFÍAS DE LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD

D.1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se proporcionan los datos, registros y fotografías relacionados con las probetas-testigos que se han destinado a ensayos de durabilidad, concretamente para el ensayo de penetración de cloruros y de expansión por reacción sulfática interna.

En primer lugar (apartado D2), se presentan los datos obtenidos de la caracterización previa realizada sobre los testigos, y durante la cual se han determinado las dimensiones (diámetro (\emptyset) y altura (h)); el peso y la velocidad del pulso ultrasónico.

A continuación, en relación al ensayo de penetración de cloruros, en el apartado D3 se muestra el registro fotográfico realizado tras aplicar la solución de nitrato de plata sobre las 51 probetas-testigo analizadas, clasificándolas en función del tiempo de exposición (62, 95 y 205 días), y de la dosificación a la que pertenecen. Para completar la información del ensayo, en el apartado D4 se adjuntan en sendas tablas, la distancia de penetración medida desde la superficie, tanto desde la cara superior de la probeta (sin recubrimiento epoxy), como desde las caras laterales (con recubrimiento epoxy).

Finalmente, en el apartado D5 se muestran los registros tomados, con ayuda del reloj comparador, durante el ensayo de expansión por sulfatos sobre las 42 muestras, para los tiempos de inmersión igual a 0, 2, 5, 7, 14, 21, 28, 56, 77, 91, 105, 119 y 187 días.

D.2 CARACTERIZACIÓN PROBETAS-TESTIGO (extraídas de los TCY)

D.2.1 Batache #1 (dosificación HRM/AC20)

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HRM/AC20	1111	93,9	193,5	2,831	3948	0,588
	1112	93,9	191,8	2,791	4077	0,588
	1113	94,2	182,2	2,672	3969	0,588
	1121	94,2	186,8	2,803	4074	1,175
	1122	93,8	190,9	2,807	4062	1,175
	1123	-	-	-	-	-
	1131	93,8	190,7	2,799	3887	1,763
	1132	94,0	183,2	2,733	3978	1,763
	1133	-	-	-	-	-
	1211	94,0	138,4	2,011	3925	0,588
	1212	93,9	180,7	2,645	3942	0,588
	1213	93,8	133,4	1,944	3999	0,588
	1221	93,8	144,2	2,123	3946	1,175
	1222	94,0	190,4	2,807	3926	1,175
	1223	94,0	146,0	2,147	3989	1,175
	1231	93,9	179,4	2,661	3850	1,763
	1232	93,9	197,2	2,924	3967	1,763
	1233	-	-	-	-	-
	1311	93,8	190,1	2,793	3994	0,588
	1313	94,0	138,8	2,027	4081	0,588
	1314	94,6	139,2	2,033	4075	0,588
	1321	93,9	131,5	1,925	3954	1,175
	1322	94,0	165,7	2,438	4071	1,175
	1323	93,9	139,7	2,061	4014	1,175
	1331	93,8	110,4	1,652	3879	1,763
	1332	93,9	190,5	2,829	3746	1,763
	1333	-	-	-	-	-

Tabla D2.1. Caracterización de probetas-testigo TCY. Dosificación HRM/AC20 (Batache #1)

D.2.2 Batache #2 (dosificación HRF/AC12-35b)

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HRF/AC12-35b	2111	94,0	191,7	2,811	3974	0,525
	2112	94,2	191,6	2,826	4147	0,525
	2113	94,4	184,4	2,709	4026	0,525
	2121	93,8	191,7	2,820	4114	1,050
	2122	93,8	183,8	2,682	4154	1,050
	2123	94,1	183,4	2,700	4048	1,050
	2131	93,9	169,4	2,475	3940	1,575
	2132	94,1	166,4	2,446	4054	1,575
	2133	94,2	186,5	2,734	4080	1,575
	2211	94,0	191,2	2,797	4056	0,525
	2212	94,0	188,4	2,782	4123	0,525
	2213	94,1	191,3	2,832	4007	0,525
	2221	93,9	189,3	2,763	4015	1,050
	2222	94,0	187,7	2,725	4112	1,050
	2223	94,1	193,3	2,826	4060	1,050
	2231	93,9	179,0	2,612	4091	1,575
	2232	93,9	185,1	2,682	4145	1,575
	2233	94,1	189,8	2,764	3958	1,575
	2311	94,1	185,7	2,731	4069	0,525
	2312	94,0	192,9	2,829	4109	0,525
	2313	94,0	186,6	2,722	4070	0,525
	2321	94,0	183,8	2,689	4027	1,050
	2322	94,4	185,6	2,706	4115	1,050
	2323	94,4	181,9	2,646	3985	1,050
	2331	94,0	185,7	2,707	4019	1,575
	2332	94,1	189,7	2,734	4105	1,575
	2333	94,2	184,0	2,646	4031	1,575

Tabla D2.2. Caracterización de probetas-testigo. Dosificación HRF/AC12-35b (Batache #2)

D.2.3 Batache #3 (dosificaciones HRM/AC12 y HRM/AC12)

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HRM/AC20	3111	94,0	188,7	2,761	3956	0,538
	3112	94,1	192,2	2,801	4067	0,538
	3113	94,5	177,0	2,577	3991	0,538
	3211	93,9	192,7	2,765	-	0,538
	3212	94,2	185,5	2,700	4077	0,538
	3213	94,5	195,9	2,816	3887	0,538
	3311	93,9	184,7	2,653	3872	0,538
	3312	94,2	184,5	2,691	4033	0,538
	3314	94,1	142,8	2,083	3757	0,538

Tabla D2.3. Caracterización de probetas-testigo. Dosificación HRM/AC12

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HM/AC12	3121	94,3	187,9	2,939	4218	1,075
	3122	94,2	188,6	2,966	4479	1,075
	3123	94,2	184,7	2,859	4310	1,075
	3131	94,1	193,2	3,030	4447	1,613
	3132	94,2	144,3	2,279	4432	1,613
	3133	94,4	192,6	3,035	4402	1,613
	3221	94,1	151,3	2,365	4411	1,075
	3222	94,1	154,1	2,417	4486	1,075
	3224	94,2	189,3	2,983	4357	1,075
	3231	94,1	192,0	3,022	4440	1,613
	3232	93,8	140,4	2,202	4472	1,613
	3233	94,0	193,1	3,040	4429	1,613
	3321	94,3	112,9	1,783	4286	1,075
	3323	93,9	192,0	3,004	4455	1,075
	3324	93,9	192,4	3,003	4403	1,075
	3332	93,9	187,4	2,941	4494	1,613
	3334	93,8	142,5	2,221	4397	1,613

Tabla D2.4. Caracterización de probetas-testigo. Dosificación HM/AC12

D.2.4 Batache #4 (dosificación HRM/AC20+I)

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HRM/AC20+I	4111	94,0	164,6	2,383	4058	0,550
	4112	94,2	188,9	2,792	4036	0,550
	4113	94,2	189,7	2,684	3928	0,550
	4121	94,0	188,8	2,766	4078	1,100
	4122	93,8	191,1	2,779	4124	1,100
	4123	94,3	189,2	2,725	4029	1,100
	4131	94,0	189,3	2,777	4020	1,650
	4132	94,3	191,5	2,803	4181	1,650
	4133	94,4	181,1	2,638	3971	1,650
	4211	94,0	189,8	2,759	4056	0,550
	4212	93,7	187,0	2,715	4142	0,550
	4213	94,2	189,3	2,761	4076	0,550
	4221	94,0	191,6	2,808	4073	1,100
	4222	93,9	191,8	2,802	4197	1,100
	4223	94,2	189,1	2,778	4080	1,100
	4231	93,9	182,5	2,697	4052	1,650
	4232	94,0	189,6	2,783	4157	1,650
	4233	94,5	191,8	2,835	4151	1,650
	4311	93,9	189,3	2,749	4079	0,550
	4312	94,0	183,3	2,663	4120	0,550
	4313	94,3	189,7	2,748	4079	0,550
	4321	94,0	190,9	2,820	4127	1,100
	4322	94,0	190,6	2,804	4235	1,100
	4323	94,4	186,7	2,751	4094	1,100
	4331	93,9	188,4	2,779	4099	1,650
	4332	93,8	191,4	2,801	4188	1,650
	4333	94,6	187,7	2,761	4129	1,650

Tabla D2.5. Caracterización de probetas-testigo. Dosificación HRM/AC20+I (Batache #4)

D.2.5 Batache #5 (dosificación HRF/AC12-35a)

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HRF/AC12-35a	5111	94,2	126,1	1,777	3618	0,575
	5112	93,9	184,7	2,624	3754	0,575
	5113	94,4	132,1	1,886	3847	0,575
	5121	94,2	176,8	2,527	3790	1,150
	5122	94,2	182,5	2,598	3782	1,150
	5123	94,4	122,4	1,762	3749	1,150
	5131	93,9	144,0	2,142	3412	1,725
	5132	94,0	150,2	2,071	3783	1,725
	5133	-	-	-	-	-
	5211	94,2	176,4	2,492	3726	0,575
	5212	93,9	176,3	2,511	3787	0,575
	5213	94,4	103,4	1,489	3741	0,575
	5221	93,8	190,6	2,700	3691	1,150
	5222	94,1	184,8	2,630	3799	1,150
	5223	94,6	191,6	2,745	3738	1,150
	5231	94,2	192,1	2,746	3597	1,725
	5232	94,0	187,6	2,689	3813	1,725
	5233	94,2	191,3	2,751	3755	1,725
	5311	94,0	193,6	2,699	3712	0,575
	5312	94,0	185,6	2,596	3719	0,575
	5313	94,1	199,5	2,845	3742	0,575
	5321	94,3	195,0	2,777	3621	1,150
	5322	93,9	184,6	2,591	3703	1,150
	5323	94,3	184,0	2,636	3733	1,150
	5331	94,0	187,6	2,633	3650	1,725
	5332	94,0	180,6	2,564	3763	1,725
	5333	94,4	163,3	2,342	3609	1,725

Tabla D2.6. Caracterización de probetas-testigo. Dosificación HRF/AC12-35a (Batache #5)

D.2.6 Batache #6 (dosificación HRF/AC20-50)

Dosificación	Probeta	Ø (mm)	h (mm)	Peso (kg)	Vel. US (m/s)	Cota (m)
HRF/AC20-50	6111	93,8	187,9	2,802	4213	0,375
	6112	93,9	179,4	2,663	4217	0,375
	6113	94,0	187,1	2,789	4140	0,375
	6121	93,6	184,0	2,748	4245	0,750
	6122	93,7	187,0	2,800	4300	0,750
	6123	94,0	187,9	2,831	4231	0,750
	6131	93,8	188,9	2,820	4151	1,125
	6132	93,6	180,3	2,693	4203	1,125
	6133	94,2	189,8	2,863	4189	1,125
	6211	93,9	188,5	2,804	4251	0,375
	6212	93,8	196,5	2,923	4208	0,375
	6213	94,1	174,2	2,623	4129	0,375
	6221	94,0	190,2	2,859	4227	0,750
	6222	93,9	175,7	2,625	4276	0,750
	6223	93,8	191,2	2,845	4202	0,750
	6231	93,8	187,0	2,777	4183	1,125
	6232	93,8	180,4	2,696	4186	1,125
	6233	93,7	186,2	2,779	4175	1,125
	6311	93,7	188,3	2,809	4338	0,375
	6312	94,2	174,1	2,585	4215	0,375
	6313	94,1	127,1	1,901	4175	0,375
	6321	93,2	187,2	2,751	4193	0,750
	6322	93,6	183,5	2,734	4298	0,750
	6323	93,9	196,6	2,924	4246	0,750
	6331	92,9	175,7	2,564	4120	1,125
	6332	93,1	194,9	2,849	4206	1,125
	6333	93,8	149,3	2,187	4056	1,125

Tabla D2.7. Caracterización de probetas-testigo. Dosificación HRF/AC20-50 (Batache #6)

D.3 ENSAYO PENETRACIÓN DE CLORUROS. REGISTRO FOTOGRÁFICO.

D.3.1 Tiempo de exposición: 62 días



Figura D3.1. a) Dosificación: HRM/AC12; b) y c) Dosificación patrón HM/AC12 - 62 días



Figura D3.2. Dosificación HRM/AC20 - 62 días



Figura D3.3. Dosificación HRM/AC20+I - 62 días



Figura D3.4. Dosificación HRF/AC12-35a - 62 días



Figura D3.5. Dosificación HRF/AC12-35b - 62 días



Figura D3.6. Dosificación HRF/AC20-50 - 62 días

D.3.2 Tiempo de exposición: 95 días



Figura D3.7. a) Dosificación: HRM/AC12; b) y c) Dosificación patrón HM/AC12 - 95 días



Figura D3.8. Dosificación HRM/AC20 – 95 días



Figura D3.9. Dosificación HRM/AC20+I – 95 días



Figura D3.10. Dosificación HRF/AC12-35a – 95 días



Figura D3.11. Dosificación HRF/AC12-35b – 95 días



Figura D3.12. Dosificación HRF/AC20-50 – 95 días

D.3.3 Tiempo de exposición: 205 días



Figura D3.13. a) Dosificación: HRM/AC12; b) y c) Dosificación patrón HM/AC12 - 205 días



Figura D3.14. Dosificación HRM/AC20 – 205 días



Figura D3.15. Dosificación HRM/AC20+I – 205 días

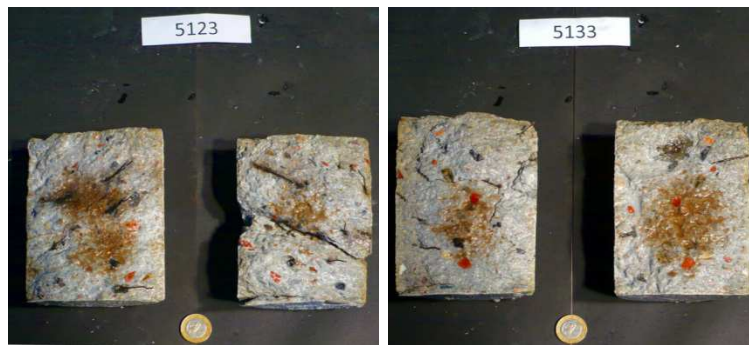


Figura D3.16. Dosificación HRF/AC12-35a – 205 días



Figura D3.17. Dosificación HRF/AC12-35b – 205 días



Figura D3.18. Dosificación HRF/AC20-50 – 205 días

D.4 ENSAYO PENETRACIÓN DE CLORUROS. MEDIDAS (X_d)

D.4.1 Tiempo de exposición: 62 días

Dosificación	Probeta	$x_d = f(d)$								
		10	20	30	40	50	60	70	80	\bar{x}_d
HRM/AC20	1111	-	-	55,2	33,6	29,4	29,4	44,9	55,1	30,8
		-	-	43,0	27,0	28,2	32,3	53,7	-	29,2
	1121	41,1	32,4	26,7	26,4	29,6	30,3	35,2	63,2	28,3
		42,0	31,3	27,3	21,2	23,1	28,9	42,4	72,3	25,1
	1131	-	-	27,4	19,2	18,9	23,8	43,9	-	22,3
		-	-	26,6	26,6	27,0	41,4	-	-	26,7
HRF/AC12-35b	2111	-	74,3	46,4	35,9	38,0	30,1	35,4	63,8	34,1
		-	70,5	52,9	37,8	35,7	24,0	27,4	51,6	31,2
	2121	-	20,5	11,5	9,1	11,5	13,6	16,7	25,1	12,5
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2131	-	47,7	26,8	26,2	27,1	26,9	23,9	-	26,2
		-	64,9	33,4	32,5	28,3	24,4	25,0	68,2	28,7
HRM/AC12	3111	-	43,9	36,2	39,5	39,8	43,3	34,0	58,1	38,6
		-	90,7	75,0	43,8	39,8	37,6	-	-	40,4
HM/AC12	3121	-	76,2	54,3	47,1	43,8	46,4	78,9	-	45,8
		-	89,2	64,6	44,1	45,9	42,9	42,1	-	43,8
	3131	47,5	40,4	33,8	31,1	29,1	34,2	-	-	31,3
		-	-	34,0	34,0	34,7	37,8	44,8	69,5	35,1
HRM/AC20+I	4111	-	28,9	21,1	21,0	18,7	23,1	25,8	59,3	21,0
		56,0	24,0	18,1	16,2	15,8	18,8	22,4	55,9	17,2
	4121	-	14,4	9,9	13,7	17,3	20,5	20,6	28,1	19,6
		83,3	18,9	14,0	17,5	15,3	14,3	13,6	15,9	15,6
	4131	-	23,2	16,9	18,5	20,2	21,6	20,8	22,2	19,6
		-	23,7	18,3	16,7	20,5	21,7	23,2	41,2	20,1
HRF/AC12-35a	5111	-	-	48,8	44,2	51,6	61,8	-	-	48,2
		-	66,5	52,4	42,7	37,9	39,3	65,6	-	40,6
	5121	-	-	72,1	36,9	36,1	42,2	-	-	36,5
		-	-	40,2	29,0	33,7	60,7	-	-	31,4
	5131	-	-	51,4	42,5	42,4	48,5	61,2	-	42,5
		-	-	94,9	38,5	34,5	41,3	-	-	36,5
HRF/AC20-50	6111	30,5	17,5	13,5	14,7	15,0	10,8	21,6	36,8	14,3
		44,0	13,8	8,8	8,8	11,2	15,6	14,5	39,7	12,1
	6121	76,3	33,7	12,8	10,9	11,6	14,7	17,1	-	13,4
		-	75,6	15,3	15,8	17,6	18,6	25,2	-	16,8
	6131	-	15,2	14,6	17,8	19,0	16,6	19,7	32,2	17,1
		-	14,0	12,3	13,0	15,0	13,7	15,8	17,6	14,0

Tabla D4.1. Frentes de penetración a 62 días (en mm). Superficie superior

D.4.2 Tiempo de exposición: 95 días

Dosificación	Probeta	$x_d = f(d)$								
		10	20	30	40	50	60	70	80	\bar{x}_d
HRM/AC20	1112	-	-	53,9	43,8	40,9	44,0	-	-	42,4
		-	-	37,9	35,5	35,6	42,0	70,8	-	35,6
	1122	-	-	40,0	32,7	32,3	35,1	39,4	-	33,4
		-	38,4	30,1	28,3	28,2	32,8	54,8	-	29,9
	1132	-	48,8	20,6	19,1	20,9	26,6	45,8	-	21,8
		-	-	26,4	23,5	22,2	25,1	26,5	-	24,3
HRF/AC12-35b	2112	-	32,4	27,5	16,8	20,4	19,1	23,9	-	21,5
		-	31,9	20,3	23,2	21,2	18,3	26,8	-	20,8
	2122	-	44,3	24,9	19,3	18,8	20,0	36,7	-	20,8
		-	23,8	17,3	20,2	22,7	25,1	31,7	-	21,3
	2132	-	-	25,2	20,2	20,7	33,2	33,9	-	22,0
		-	-	26,3	26,3	23,7	23,6	28,0	-	25,0
HRM/AC12	3112	-	47,5	40,2	30,6	28,6	34,3	46,7	-	31,2
		-	-	46,4	40,7	39,0	48,0	-	-	39,9
HM/AC12	3122	-	-	51,6	49,9	56,6	79,2	-	-	-
		-	-	65,9	60,6	65,3	83,3	-	-	-
	3132	-	58,1	49,1	39,6	29,3	36,0	62,3	-	35,0
		-	64,1	54,0	35,4	36,8	33,4	64,5	-	35,2
HRM/AC20+I	4112	-	54,6	25,3	26,0	24,6	24,3	75,2	-	25,1
		-	45,0	24,4	21,4	21,9	20,9	28,1	-	22,2
	4122	-	31,2	18,9	21,1	21,6	21,7	25,3	-	20,2
		-	32,9	23,0	21,2	17,4	21,1	25,1	54,7	20,7
	4132	-	41,4	26,2	22,5	19,4	17,3	-	-	21,3
		-	-	18,9	18,3	20,0	23,0	-	-	20,1
HRF/AC12-35a	5112	-	51,6	36,4	34,4	33,7	32,7	36,5	49,8	34,3
		-	-	49,6	32,0	38,6	40,9	-	-	35,3
	5122	-	-	39,2	36,4	37,5	45,7	-	-	37,0
		-	-	40,2	38,2	36,5	42,6	-	-	37,4
	5132	-	-	64,5	52,9	35,0	37,9	56,6	77,2	36,5
		-	-	45,6	42,0	41,8	43,9	65,1	80,7	42,6
HRF/AC20-50	6112	35,3	29,2	19,3	17,5	13,9	14,3	17,1	19,0	16,4
		33,7	26,7	18,3	15,7	15,4	14,6	19,1	48,7	16,6
	6122	-	23,6	20,1	20,0	18,9	18,2	21,6	-	19,8
		-	23,7	18,2	16,9	19,5	17,6	16,0	-	17,6
	6132	-	40,5	23,3	15,6	17,6	17,7	21,3	-	19,1
		-	19,8	14,2	15,0	19,9	20,9	28,8	-	18,0

Tabla D4.2. Frentes de penetración a 95 días (en mm). Superficie superior

D.4.3 Tiempo de exposición: 205 días

Dosificación	Probeta	$x_d = f(d)$								
		10	20	30	40	50	60	70	80	\bar{x}_d
HRM/AC20	1113	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
HRF/AC12-35b	2113	-	-	58,2	49,9	55,9	-	-	-	49,9
		-	58,0	31,7	27,0	33,4	65,0	-	-	27,0
	2123	-	-	38,0	32,5	28,0	29,0	43,3	-	29,8
		-	-	33,0	29,2	31,6	39,1	-	-	31,3
	2133	-	-	-	-	36,3	40,6	-	-	36,3
		-	-	-	36,1	34,8	41,5	-	-	35,5
HRM/AC12	3113	-	56,3	43,0	31,2	37,8	57,7	-	-	34,5
		-	34,0	31,6	32,7	32,0	37,8	44,0	-	33,6
HM/AC12	3123	-	-	34,5	32,2	32,5	51,3	-	-	33,1
		-	-	42,6	40,0	32,7	38,1	66,8	-	32,7
	3133	-	36,0	21,1	17,9	20,2	21,9	23,1	31,4	20,8
		-	-	19,9	18,1	17,7	24,6	-	-	20,1
HRM/AC20+I	4113	-	-	31,0	26,9	34,0	28,0	38,0	-	30,0
		-	57,2	31,0	27,0	25,0	26,0	34,6	-	27,3
	4123	-	-	35,0	32,3	30,3	32,0	62,8	-	32,3
		-	-	28,8	24,1	24,0	28,2	53,6	-	26,3
	4133	-	-	38,0	27,7	27,5	26,7	35,0	-	29,2
		-	-	43,0	33,5	30,4	31,5	43,3	-	31,8
HRF/AC12-35a	5123	-	-	40,4	37,9	32,0	28,9	37,1	-	32,9
		-	-	42,7	38,3	41,6	46,0	-	-	40,0
	5133	-	-	54,4	49,4	45,8	45,6	-	-	46,9
		-	-	45,3	39,8	37,3	35,5	46,1	-	37,5
HRF/AC20-50	6113	-	-	25,5	19,0	17,0	20,6	22,0	-	20,5
		-	-	39,1	32,0	30,4	33,0	-	-	31,8
	6123	-	26,0	20,4	18,0	20,2	22,4	29,9	67,0	20,3
		-	32,0	26,4	24,0	22,1	21,5	27,6	53,0	24,3
	6133	-	54,5	35,3	29,0	31,0	36,3	50,0	-	32,9
		-	-	28,0	27,0	23,6	33,0	42,0	-	27,9

Tabla D4.3. Frentes de penetración a 205 días (en mm). Superficie superior

D.5 ENSAYO DE EXPANSIÓN SULFÁTICA INTERNA. REGISTROS REALIZADOS CON EL RELOJ COMPARADOR

Dosificación	Probeta	L = f(tiempo inmersión)						
		0		2	5	7	14	21
HM/AC12	3323	2,539	2,535	2,553	2,556	2,557	2,566	2,571
	3324	2,559	2,555	2,595	2,603	2,606	2,618	2,618
	3332	2,555	2,552	2,596	2,606	2,610	2,620	2,612

Dosificación	Probeta	L = f(tiempo inmersión)						
		28	56	77	91	105	119	187
HM/AC12	3323	2,560	2,565	2,560	2,565	2,563	2,571	2,559
	3324	2,607	2,619	2,620	2,618	2,621	2,623	2,613
	3332	2,606	2,613	2,611	2,606	2,607	2,618	2,616

Tabla D5.1. Registro del reloj comparador. Muestras de la dosificación patrón HM/AC12

Dosificación	Probeta	L = f(tiempo inmersión)						
		0		2	5	7	14	21
HRM/AC20	1311	2,537	2,537	2,575	2,581	2,584	2,600	2,592
	1322	2,517	2,514	2,562	2,570	2,573	2,583	2,577
	1332	0,545	0,540	0,576	0,582	0,589	0,600	0,605
HRM/AC12	3311	2,506	2,505	2,557	2,559	2,562	2,574	2,571
	3312	2,553	2,554	2,600	2,610	2,615	2,620	2,623
HRM/AC20+I	4311	2,597	2,596	2,621	2,635	2,638	2,652	2,650
	4312	2,558	2,554	2,572	2,582	2,588	2,606	2,607
	4313	2,554	2,548	2,571	2,582	2,589	2,600	2,597
	4321	2,538	2,539	2,551	2,568	2,568	2,581	2,577
	4322	3,316	3,311	3,339	3,350	3,355	3,366	3,369
	4323	2,553	2,553	2,584	2,595	2,600	2,622	2,631
	4331	2,902	2,902	2,927	2,936	2,938	2,952	2,953
	4332	2,583	2,583	2,609	2,616	2,620	2,636	2,629
4333	2,557	2,555	2,575	2,585	2,586	2,599	2,598	

Dosificación	Probeta	L = f(tiempo inmersión)						
		28	56	77	91	105	119	187
HRM/AC20	1311	2,581	2,587	2,594	2,588	2,592	2,593	2,588
	1322	2,567	2,584	2,585	2,578	2,582	2,580	2,576
	1332	0,589	0,604	0,604	0,597	0,605	0,607	0,603
HRM/AC12	3311	2,560	2,575	2,576	2,571	2,575	2,578	2,572
	3312	2,610	2,619	2,616	2,615	2,619	2,625	2,616

HRM/AC20+I	4311	2,639	2,653	2,652	2,651	2,651	2,657	2,653
	4312	2,597	2,611	2,615	2,609	2,612	2,619	2,608
	4313	2,584	2,601	2,606	2,596	2,600	2,603	2,600
	4321	2,568	2,563	2,575	2,574	2,574	2,573	2,569
	4322	3,355	3,383	3,379	3,385	3,384	3,394	3,389
	4323	2,614	2,626	2,625	2,623	2,624	2,626	2,620
	4331	2,941	2,947	2,952	2,950	2,947	2,949	2,946
	4332	2,621	2,634	2,636	2,631	2,635	2,640	2,628
4333	2,589	2,601	2,599	2,598	2,606	2,611	2,592	

Tabla D5.2. Registro del reloj comparador. Muestras de las dosificaciones HRM

Dosificación	Probeta	L = f(tiempo inmersión)						
		0	0	2	5	7	14	21
HRF/AC12-35b	2311	2,567	2,566	2,576	2,582	2,583	2,594	2,596
	2312	2,552	2,545	2,561	2,571	2,576	2,587	2,583
	2313	2,549	2,551	2,569	2,584	2,589	2,600	2,595
	2321	2,602	2,600	2,615	2,623	2,627	2,636	2,639
	2322	2,557	2,553	2,568	2,575	2,577	2,591	2,583
	2323	2,544	2,545	2,564	2,574	2,578	2,590	2,591
	2331	2,540	2,544	2,560	2,568	2,570	2,581	2,585
	2332	2,543	2,539	2,559	2,562	2,565	2,572	2,566
HRF/AC12-35a	5311	2,598	2,599	2,622	2,626	2,630	2,640	2,638
	5312	2,580	2,578	2,594	2,604	2,609	2,617	2,617
	5313	2,557	2,557	2,577	2,586	2,591	2,604	2,609
	5321	2,525	2,529	2,547	2,552	2,553	2,565	2,559
	5322	2,550	2,553	2,580	2,567	2,566	2,567	2,572
	5323	2,521	2,523	2,536	2,544	2,548	2,554	2,554
	5331	2,553	2,555	2,569	2,576	2,584	2,601	2,589
	5332	2,518	2,516	2,540	2,538	2,536	2,553	2,550
5333	2,541	2,541	2,565	2,571	2,576	2,583	2,587	
HRF/AC20-50	6311	2,555	2,555	2,567	2,577	2,581	2,594	2,594
	6312	2,641	2,643	2,654	2,653	2,655	2,671	2,669
	6312	2,538	2,539	2,565	2,570	2,573	2,577	2,578
	6322	2,553	2,549	2,560	2,564	2,569	2,578	2,575
	6323	2,569	2,564	2,585	2,587	2,586	2,599	2,595
	6331	2,633	2,634	2,652	2,662	2,670	2,679	2,676
	6332	2,545	2,547	2,552	2,563	2,564	2,576	2,572

Dosificación	Probeta	L = f(tiempo inmersión)						
		28	56	77	91	105	119	187
HRF/AC12-35b	2111	2,584	2,596	2,594	2,593	2,592	2,598	2,590
	2311	2,567	2,583	2,583	2,574	2,577	2,584	2,578
	2312	2,586	2,599	2,600	2,595	2,595	2,600	2,599
	2313	2,627	2,639	2,635	2,638	2,643	2,649	2,631
	2321	2,572	2,581	2,582	2,582	2,586	2,591	2,584
	2322	2,581	2,593	2,590	2,592	2,591	2,595	2,589
	2323	2,574	2,585	2,591	2,586	2,589	2,595	2,588
	2331	2,554	2,560	2,557	2,561	2,560	2,564	2,555
	2332	2,580	2,592	2,594	2,586	2,588	2,595	2,586
HRF/AC12-35a	5311	2,623	2,644	2,645	2,638	2,640	2,648	2,638
	5312	2,609	2,620	2,621	2,621	2,626	2,633	2,630
	5313	2,598	2,616	2,610	2,612	2,612	2,617	2,604
	5321	2,549	2,559	2,562	2,558	2,564	2,568	2,557
	5322	2,563	2,579	2,583	2,580	2,575	2,578	2,569
	5323	2,542	2,553	2,551	2,553	2,552	2,555	2,550
	5331	2,582	2,598	2,600	2,598	2,594	2,597	2,595
	5332	2,544	2,555	2,563	2,566	2,560	2,561	2,556
HRF/AC20-50	6311	2,584	2,594	2,592	2,593	2,602	2,609	2,592
	6312	2,662	2,670	2,667	2,668	2,663	2,668	2,661
	6312	2,569	2,580	2,575	2,579	2,578	2,588	2,577
	6322	2,558	2,572	2,572	2,565	2,570	2,572	2,568
	6323	2,589	2,597	2,597	2,601	2,601	2,601	2,598
	6331	2,669	2,681	2,676	2,681	2,681	2,686	2,674
	6332	2,556	2,570	2,567	2,570	2,569	2,577	2,564

Tabla D5.3. Registro del reloj comparador. Muestras de las dosificaciones HRF

ANEJO E FICHAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES EXPERIENCIA EN ESCOFET 1886, S.A

E.1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se presentan las especificaciones y fichas técnicas de los materiales empleados en la experiencia realizada en la planta de la empresa ESCOFET 1886, S.A, concretamente para la fabricación de la pieza de mobiliario urbano “BANCO MODULAR CÓNCAVO”, así como el acta de resultados de los ensayos a compresión y flexión realizados sobre las probetas moldeadas.

E.2 FICHAS TÉCNICAS DE MATERIALES

E.2.1 Cemento CEM I 52,5R



EN 197-1 - CEM I 52,5 R

DESCRIPCIÓN:

Nuestro **SUPER DRAGON** es un cemento de alta resistencia, diseñado principalmente para la industria del prefabricado de hormigón. Sus características principales son:

- Altas resistencias iniciales y finales.
- Endurecimiento rápido, incluso en tiempo frío.

CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO:

	Valor habitual	Especificaciones según norma	
Clinker (%)	98	min. 95 - máx. 100	
Componente minoritario (%)	2	min. 0 - máx. 5	
Pérdida por calcinación (%)	2,5	máx. 5,0	(1)
Sulfato, SO ₄ (%)	3,4	máx. 4,0	
Cloruro, Cl ⁻ (%)	0,04	máx. 0,10	
Residuo insoluble (%)	0,70	máx. 5,0	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	4600	-	(2)
Expansión La Chatelier (mm)	0,5	máx. 10	
Inicio fraguado (min)	110	min. 45	
Final fraguado (min)	170	máx. 720	
Compresión a 1 día (MPa)	27	-	(3)
Compresión a 2 días (MPa)	40	min. 30,0	
Compresión a 7 días (MPa)	52	-	
Compresión a 28 días (MPa)	61	min. 52,5	

(1) Químicas (2) Físicas (3) Mecánicas

AENOR certifica el cumplimiento de este cemento con las especificaciones de la norma UNE-EN 197-1 (cementos comunes), avalándolo según lo establecido en el Reglamento Particular RP 15.01 (Marca N). Por lo tanto, dispone también del correspondiente certificado CE. Este cemento contiene un agente reductor del crómio (VI). AENOR certifica también el cumplimiento del límite reglamentario del contenido en Cr (VI) soluble en agua según la norma UNE-EN 196-10.



EXPEDICIÓN Y ALMACENAMIENTO:

- Disponible a granel y en sacos de 35 kg.
- Los sacos deben almacenarse en lugares secos y ventilados. Deben quedar protegidos de la humedad del suelo y del ambiente.
- El almacenamiento de cemento a granel debe realizarse en silos estancos.

RECOMENDADO PARA:

- Hormigón armado.
- Hormigón pretensado.
- Hormigón de alta resistencia.
- Prefabricados en general y, especialmente, en elementos estructurales sean pretensados o no.
- Hormigón para desencofrado, descimbrado y desmoldado rápidos, incluso en tiempo frío.

NO INDICADO PARA:

- Hormigón seco compactado.
- Hormigón con áridos potencialmente reactivos o expuesto a ambientes agresivos.

PRECAUCIONES DE PUESTA EN OBRA:

Dado el elevado contenido en clinker de este cemento y su alta reactividad, es muy importante extremar las operaciones de curado del producto final puesto en obra, sobre todo en climas calurosos, secos y eventualmente con viento.





Si necesita más información, solicitenosla.



ED.01/03

E.2.2 Árido natural CANRO 0-3

FICHA TÉCNICA				R 07.4 A	
		CANTERAS CANRO, S.A. BV-5001 - Ctra. de la Roca, Km. 10 C.P. 08105 SANT FOST DE CAMPSELLES BARCELONA		 <small>BY CANTERAS CANRO, S.A. Nº001.00-131202</small>	
EN 12620:2002+A1:2008		ARIDOS PARA HORMIGÓN			
NOMBRE COMERCIAL	TAMAÑO		CÓDIGO		
ARENA 0-3 mm	0/2		AF-T-0/2-G		
REQUISITO	VALOR	UNIDADES	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	
Tamaño de las partículas	0/2	d/D		EN 933 - 1	
Granulometría	DECLARADA		G _r 85	EN 933 - 1	
Contenido de finos	11	%	f ₁₅	EN 933 - 1	
Equivalente de arena	>45		valor informativo	EN 933 - 8	
Azul de metileno	2,8	g/kg	valor informativo	EN 933 - 9	
Densidad de las partículas	2,70	(g/cm ³)	valor declarado	EN 1097 - 6	
Absorción de agua	0,32	%	valor declarado	EN 1097 - 8	
Caras de fractura	N.A.	%		EN 933 - 5	
Índice de lascas	N.A.	%		EN 933 - 3	
Resistencia a la fragmentación	N.A.	%		EN 1097 - 2	
Desgaste Microdeval	N.A.	%		EN 1097 - 1	
Coef. Pulimento Acelerado	N.A.			EN 1097 - 8	
Durabilidad : Sulfato magnésico	2,2	%	SM ₁₀	EN 1367 - 2	
Cloruros	0,01	%	valor declarado	EN - 1744 - 1 Apdo 7	
Sulfatos solubles en ácido	0,06	%	AS _{1,2}	EN - 1744 - 1 Apdo 12	
Azufre total	0,06	%	valor umbral 1 %	EN - 1744 - 1 Apdo 11	
Carbonato cálcico	N.P.D.			EN - 196-21	
Humus	Exente	%	valor declarado	EN - 1744 - 1 Apdo 15.1	
Reactividad álcali-silice	No reactivo		valor declarado	UNE 146507-1 EX.	
Determinación de contaminantes ligeros	0	%	< 0,1 %	EN 1744 - 1 14.2	
Sustancias peligrosas	N.P.D.				
Estudio petrográfico	A.1.1.3 Roca Ígnea Plutónica: GRANODIORITA. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA CUARZO 45 % FELDESPATO POTÁSICO 15 % PLAGIOCLASA 25 % BIOTITA 15 % MOSCOVITA < 1 % %			UNE - EN 932-3	
OBSERVACIONES: MÓDULO DE FINURA = 2,4					
Huso/Tamaño	2D	1,4D	D		
Tamiz R20	4	2,8	2	1	0,25
Declarada	100	98,7	89,5	81	24,5
Límite superior	100	100	94,5	81	44,5
Límite inferior	100	95	84,5	41	6

E.2.3 Polvo de mármol 500µm



6. PRESTACIONES DECLARADAS

CARACTERÍSTICAS ESENCIALES	UNID	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	PRESTACIONES													
			MICROMAR 250	MICROMAR 500	MICROMAR 800	GRANOMAR 1	GRANOMAR 1.1	GRANOMAR 1.2	GRANOMAR 0/2	GRANOMAR 1	GRANOMAR 2,5	GRANOMAR 3	MICROMAR 350/3	0/2	0/6	6/16
			Uso en productos prefabricados de hormigón													
			Uso en productos prefabricados de hormigón													
			Uso en productos prefabricados de hormigón													
Tamaño de los áridos	EN 12620-2002		0/1	0/1	0/1	0/2	0/2	0/1	0/2	0/2	0/4	0/4	0/4	0/2	0/6	6/16
Distribución granulométrica	EN 12620-2002	Categoría	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	G _{0,90}	G _{0,15}
Granulometría	EN 933-1		Ver tabla siguiente (- Granulometrías)													
Formo de las partículas - Índice de Laja	EN 933-3	Categ. Fl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F ₁₀
Formo de las partículas - Coeficiente de Forma	EN 933-4	Categ. Sf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	S ₁₀
Resistencia a la fragmentación - Coeficiente de Los Ángeles	EN 1097-2	Categ. LA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LA ₁₀
Resistencia al desgaste - Coeficiente Micro-Deval	EN 1097-8	Categ. M _{cu}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	M _{cu35}
Resistencia al pulimento - Coeficiente de Pulimento Acelerado	EN 1097-9	Categ. CPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	CPA ₆₀
Densidad de partículas	EN 1097-6	Mg/m ³	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Contenido en finos	EN 933-10	Categoría	5-f ₁₀₀	4-f ₆₀	4-f ₃₀	2-f ₁₀	2-f ₁₀	2-f ₁₀	4-f ₃₀	1-f ₆	1-f ₃	1-f ₃	3-f ₃₀	4-f ₁₂	f ₁₀	f ₆
Calidad de los finos - Equivalente de arena (SE)	EN 933-8	SE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	>75	>75	-
Calidad de los finos - Azul de metileno (MB)	EN 933-9	MB (g Azul / Kg)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,2	0,2	-
Contenido en cloruros	EN 1744-1/7	% Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<0,01	<0,01	<0,01
Contenido en sulfatos	EN 1744-1/13	Categoría AS	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,8}	AS _{0,8}	AS _{0,8}
Contenido en compuestos de azufre	EN 1744-1/11	% S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<0,02	<0,02	<0,02
Compuestos que afectan al estado superficial de los hormigones - Contaminante orgánicos ligeros	EN 1744-1/14.2	% m ₁₀₀	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Compuestos que alteran la velocidad y fraguado del mortero																
- Determinación del contenido en Humus (Hidróxido de Sodio)	EN 1744-1/15.1	Color respecto solución patrón	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro	Más claro
- Variación del tiempo de fraguado	EN 1744-1/15.5	min	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20	+20
- Variación de la resistencia a la compresión	EN 1744-1/15.5	%	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9,3	-9	-9	-9
Solubilidad en agua	EN 1744-1/16	WS	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Absorción de agua	EN 1097-6	WA	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Resistencia al hielo y al deshielo	-	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Reactividad alcali-silice	-	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Pérdida por calcinación	EN 1744-1/17	%	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

EN 12620:2008+A1:2008





■ Granulometrías

PRODUCTO	ABERTURA TÁMICES - % PASANTE																
	20	16	11,2	10	8	6,3	4	3,15	2,5	2	1,6	1	0,85	0,63	0,25	0,063	
Micromar® 250													100	-	95-99	85-95	50-60
Micromar® 500													100	89-100	95-99	85-95	34-44
Micromar® 800													100	99-100	90-95	48-68	16-25
Granomar® 1												100	64-89	-	-	0-10	0-4
Granomar® 1,1											100	98-100	70-65	-	0-30	0-10	0-5
Granomar® 1,2											100	80-99	30-70	-	0-40	0-13	0-5
Granomar® 0/2										100	90-100	-	40-80	-	-	10-60	0-18
Granomar® 2								100	98-100	45-75	5-35	0-15	-	0-30	0-5	0-2	
Granomar® 2,5								100	90-99	35-60	5-35	0-15	-	0-30	0-5	0-2	
Granomar® 3							100	-	-	10/45	-	0-5	-	-	0-5	0-2	
Granomar® 350/5							100	-	-	35-85	-	5-45	-	-	0-20	0-6	
0/2										100	90-100	-	55-95	-	-	10-60	0-18
0/6				100	98-100	90-99	50-90	-	-	25-70	-	20-50	-	-	10-25	0-10	
6/16	100	90-98	40-70	-	5-23	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-	-	-	-	0-2

Las prestaciones del producto identificado en el punto 1 son conformes con las prestaciones declaradas en el punto 6.
La presente declaración de prestaciones se emite bajo la única responsabilidad del fabricante indicado en el punto 2.

Luís Jesús Garciamuñoz Miras
Director Facultativo
Sant Celoni, 01 de julio de 2013

E.2.4 Aditivo superplastificante GLENIUM ACE 425



The Chemical Company

GLENIUM ACE 425

FT 1.1.102

Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para hormigón prefabricado.

Campo de aplicación

GLENIUM ACE 425 es un aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en policarboxilatos para aplicaciones en hormigón prefabricado, donde se demande alta resistencia inicial. Su excelente poder plastificante y sus elevadas resistencias iniciales, incluso a dosificaciones bajas, hace del GLENIUM ACE 425 el aditivo ideal para la industria del hormigón prefabricado.

Zero Energy System está basado en una combinación de la tecnología avanzada de los aditivos GLENIUM ACE y la innovadora tecnología del hormigón autocompactante. Zero Energy System permite el desarrollo de resistencias iniciales, lo cual permite eliminar o reducir los requisitos de curado térmico sin que se resienta ni el rendimiento, ni la durabilidad, ni la productividad.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

Propiedades

- Excelente poder plastificante.
- Elevadas resistencias iniciales, incluso con bajas dosificaciones.
- Confección de hormigones de mayor docilidad.
- Mejora la durabilidad del hormigón y sus resistencias.
- Apto para hormigón blanco.

Modo de utilización

GLENIUM ACE 425 se adiciona al hormigón con la última parte del agua de amasado.

No adicionar el producto sobre la masa seca de cemento y áridos.

Dosificación

La dosificación habitual se encuentra entre el 0,3% y el 1,0% sobre peso de cemento según incremento de trabajabilidad y reducción de agua deseada.

Dosificaciones superiores son posibles con ensayos previos que permitan determinar la dosificación óptima.

Limpieza de herramientas

Los equipos y herramientas sucias de GLENIUM ACE 425 pueden limpiarse simplemente con agua.

Presentación

GLENIUM ACE 425 se presenta a granel, en bidones de 220 kg y en garrafas de 25 kg.

Condiciones de almacenamiento/

Tiempo de conservación

Almacenar en sus envases originales herméticamente cerrados y protegidos de temperaturas extremas. Evitar su congelación.

Almacenado correctamente, GLENIUM ACE 425 puede conservarse hasta 12 meses.

Manipulación y transporte

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos, por ejemplo usar gafas y guantes. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo. No comer, beber y fumar durante la aplicación.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de seguridad del producto.

Hay que tener en cuenta

- Se recomienda la realización de ensayos previos a la utilización del producto.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con nuestro Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.



The Chemical Company

GLENIUM ACE 425

Propiedades	
Función principal:	Reductor de agua de alta actividad / superplastificante.
Efecto secundario:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas.
Aspecto físico:	Líquido amarillento turbio.
pH, 20° C	5,5 ± 1
Densidad, 20° C:	1,048 ± 0,02 g/cm ³
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/50rpm:	< 100 cps.
Contenido en cloruros:	< 0,1%
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	

NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición. BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reintegrar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

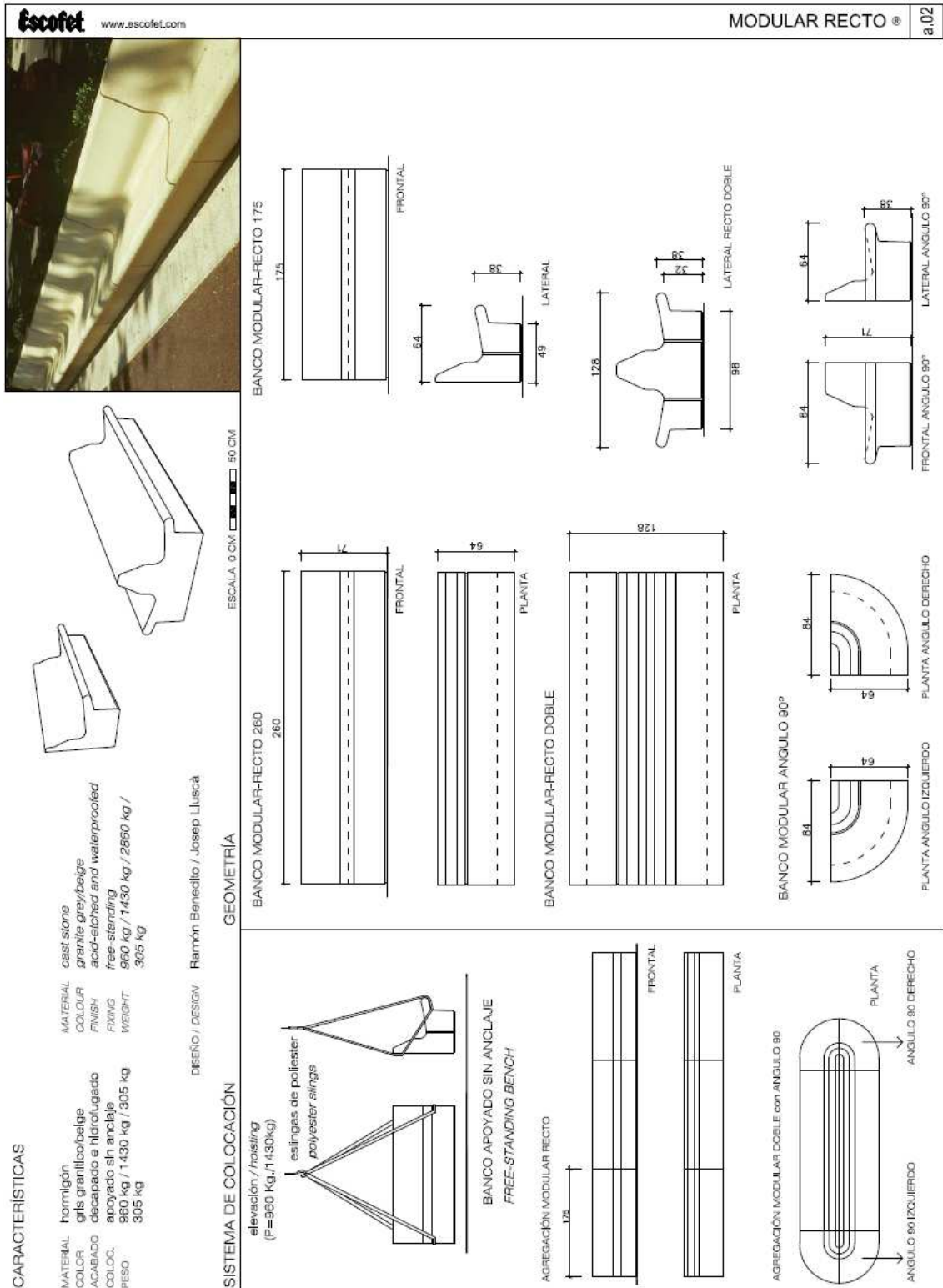
Edición 17/04/2009

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

Glenium ACE 425 Página 2 de 2

**BASF Construction
Chemicals España, S.L.**
Basters, 15
08184 Palau-Solità i Plegamans
Tel.: 93 862 00 00 - Fax: 93 862 00 20
www.basf-cc.es • basf-cc@basf-cc.es

E.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PIEZA “BANCO MODULAR”



Applus Norcontrol, S.L.U.

Praga 16-18, Pol. Ind. Cova Solera
08191 Rubí (Barcelona)
T 93 588 78 76
F 93 588 64 79

**ACTA DE RESULTADOS**

Nº MUESTRA	Nº ALBARAN	ACTA Nº	FECHA DE ACTA
PP.2014/303	11719/14	82	05/12/2014

CLIENTE: **9193**OBRA: **1046669** EXPEDIENTE: **1036393****ESCOFET 1886 S.A.**

AVDA. MONTSERRAT, Nº 162 Z. I. LA TORRE
MARTORELL
NIF: E5A08042764

PLANTA DE PREFABRICADOS ESCOFET

AVDA. MONTSERRAT, 162
MARTORELL
PETICIONARIO: SR. RAMON MUNTADAS

Toma de muestras para la realización de ensayos

TIPO DE MUESTRA:	PROBETAS PETICIONARIO	REFERENCIA PETICIONARIO:	ARIDO RECICLADO
Muestreado por laboratorio	RECOGIDO/ RECEPCIONADO POR: Sans Fernández, Victor	EN OBRA	FECHA: 04/12/2014

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN S/N UNE EN 12390-5:2001

PROBETA Nº	(*) FECHA FABRICACION	FECHA DE ROTURA	EDAD DE ROTURA (DIAS)	LADO (cm)	LARGO (cm)	RESISTENCIA A FLEXION (MPa)	REFERENCIA DEL PETICIONARIO
1	27/11/2014	04/12/2014	7	10	10	4.6	--
2	27/11/2014	25/12/2014	28	10	10	6.1	--
3	27/11/2014	25/12/2014	28	10	10	6.3	--

(*) datos proporcionados por el peticionario

OBSERVACIONES: DESVIACIONES AL MÉTODO: COMO MÉTODO DE AJUSTE SE UTILIZA LA DESBASTACIÓN DE PROBETAS EN LUGAR DEL REFRENTADO CON MORTERO DE AZULPRE.

Vº Bº DIRECTOR,

Copias enviadas a:
ESCOFET 1886 S.A.

RESPONSABLE DE AREA

Tomaso Briangos, José Ignacio

Tomaso Briangos, José Ignacio

Este informe sólo afecta a los materiales presentados a cargo según los datos indicados. La responsabilidad de cualquier error en los datos no es responsabilidad de Applus Norcontrol, S.L.U.
Laboratorio de Ensayos para el Control de Calidad de la Edificación con Declaración Responsable número LD500259 presentada a la Generalitat de Catalunya en fecha 23/07/2014
Los ensayos marcados con (*) se realizaron en la Declaración Responsable.

Applus Norcontrol, S.L.U.

Applus Norcontrol, S.L.U. Registro Mercantil de A Coruña, Tomo 2960, Folio 174, Hoja C-3521, Inscripción 110, N.I.F. B-15044357

Pág. 1 de 1

