

Consideraciones relativas al diseño y a la alta durabilidad de dovelas de hormigón reforzado con fibras no metálicas (HRFnM)

Tesis doctoral realizada por:
Janill Marie De la Cruz Romero

Dirigida por:
Ignacio Segura Pérez
Pablo Pujadas Álvarez

Programa de doctorado:
Ingeniería de la Construcción

Barcelona, febrero 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TESIS DOCTORAL

AGRADECIMIENTOS

A Dios que sin él no hubiera tomado el camino correcto en mi vida; el que nos ilumina y el que nos ayuda a poder lograr todas nuestras metas; el que me brinda la fuerza cuando me he sentido ahogada.

Agradecer a mis tutores Ignacio Segura y Pablo Pujadas por su gran apoyo en la realización de la tesis. Gracias por brindarme todos sus sabios conocimientos llenos de consejos, paciencia y motivación. Gracias por darme la oportunidad de ser parte de este hermoso equipo, en donde he crecido de manera profesional como humana. También me gustaría agradecer el apoyo que he recibido de parte del equipo de Smart Engineering, en especial al Profesor Antonio Aguado, Sergio Pialarissi y Albert de la Fuente.

También quiero agradecer a mis amigos y compañeros que he conocido durante esta etapa de mi vida, los cuales me llevo un montón de anécdotas e inolvidables recuerdos, reconociendo que esta experiencia no hubiese sido lo mismo sin ustedes. Gracias Amir, Arisleidy, Belén, Débora, Francesco, Jorge, Lara, Luis M., Razmik, Renan, Sara, Stas, Ulrig, Tai y demás colegas.

Deseando expresar un reconocimiento especial para meus amigas brasileiras Andressa, y Mylene, i als meus amics catalans Edu G. y Rubén, gracias por estar ahí para mí desde el día uno, por las mañanas de desahogos con café, por siempre hacerme sentir especial, y sobre todo por siempre darme ánimos cuando más lo necesitaba. Por otra parte, a mis compis de piso Edilene y Lidia por siempre apoyarme y estar pendiente de mis anécdotas, y mis amigas de la vida Hemaris y Karen por siempre creer en mí.

Me gustaría agradecer de manera especial a Fran Mena, Celia Vargas, Alex N. y Josep Maria, por el apoyo recibido en estos años, por sus enseñanzas y dedicación referente a distintas campañas experimentales. A los miembros del Laboratorio: Camilo, Robert, Carlos, Jordi y Tomás, por la ayuda prestada durante la realización de la campaña experimental, por siempre estar dispuestos a ayudar y los momentos divertidos que alegraban el trabajo.

La realización de la tesis no hubiese sido posible sin el apoyo económico de la beca FI-AGAUR otorgada por la Secretaria d'Universitats i Investigació de la Generalitat de Catalunya. (Resolucio ECO/1794/2015). Agradezco a la empresa Dragados por haber invertido en el Proyecto DURADOV y haberme otorgado las condiciones para la realización de los estudios de la Tesis Doctoral. Gracias Paz, María y Elena por los interesantes temas, y por siempre someternos a nuevos retos de mejoras al proyecto.

Por último y más importante quiero agradecer y dedicar esta tesis a mis padres Eduardo y Kenya, que sin ellos no soy nadie, me dieron la vida, el apoyo incondicional, entendieron mis ausencias y fueron los que siempre creyeron en mí, brindándome su apoyo moral y económico lo cual estaré agradecida eternamente. Mi hermana Katherine, por su apoyo sin condiciones, por enseñarme lo correcto y por creer en mí. A Marcos por apoyarme desde el día uno en que decidí este nuevo reto en mi vida, gracias por soportarme aun teniendo mis días más agrios, además agradezco a tu familia (Jaime y María Elena) que me ha tratado parte de ella. Finalmente, gracias Oscar y Mabel por apoyarme siempre y estar para mí.

Antes de conocer al intelecto, es imprescindible tocar y predisponer el corazón. B. Pascual

RESUMEN

El uso del hormigón reforzado con fibras (HRF) como material de construcción se ha expandido más allá de las aplicaciones tradicionales, donde su uso como material estructural ha sido aceptado por diferentes códigos y guías de diseño. El empleo del hormigón reforzado con fibras para anillos de dovelas de revestimiento de túneles ya es una práctica estándar en todo el mundo, donde se conocen las ventajas técnicas que conlleva su uso. A pesar de las numerosas ventajas del HRF, todavía existe incertidumbre en cuanto al diseño, caracterización y rendimiento de los materiales.

Existen en la literatura técnica trabajos, investigaciones y campañas experimentales tanto en dovelas reforzadas con armadura convencional, como reforzadas con la sustitución parcial o total de la armadura convencional por fibras de acero estructural. Sin embargo, los estudios sobre el concepto de dovelas de túneles prefabricados, reforzados únicamente con fibras estructurales macro sintéticas, son por el momento muy minoritarios. En algunos casos apenas son existentes, debido a la falta de experiencia con este tipo de fibras y al desconocimiento de los beneficios que pueden ofrecer a largo plazo. En este sentido, se hace necesario continuar investigando con el objetivo de mejorar los métodos actuales de caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras no metálicas.

Los principales aspectos que se abordan en esta tesis están orientados a: 1. Analizar la viabilidad estructural de las macrofibras no metálicas con finalidad estructural destinadas al uso en dovelas de revestimiento de túneles, 2. Estudiar la durabilidad de las fibras plásticas frente a agentes externos y, 3. Establecer una propuesta de diseño de dovelas reforzadas con fibras con finalidad estructural no metálicas a escala real.

Para alcanzar los objetivos de la presente Tesis Doctoral, el primer bloque se enfoca al estudio de la viabilidad estructural de las macrofibras no metálicas con finalidad estructural. Para ello se realizan diversas campañas experimentales con el fin de caracterizar el material, observándose la influencia en las propiedades físicas y mecánicas a partir del tipo y contenido de fibras empleadas en el hormigón. Posteriormente, el estudio se enfoca en la influencia de la incorporación de fibras en función a las edades tempranas. Finalmente, se concluye esta primera parte con el desarrollo de una nueva técnica capaz de determinar el contenido de las fibras en el HRFnM.

Tan importante como la capacidad resistente de las estructuras, es su capacidad para resistir durante su período de vida útil las agresiones a las que las dovelas están

expuestas. Por ello, en el segundo bloque se ha considerado estudiar la durabilidad de las fibras plásticas frente a agentes externos. A tal efecto, se realiza una campaña experimental en la que se somete el hilo madre de las fibras no metálicas a diversos ambientes agresivos y exposiciones para así caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas. De manera general, los resultados no demuestran degradaciones significativas en las muestras sobre ninguna de las diferentes disoluciones agresivas empleadas.

Finalmente, una vez estudiado la viabilidad en términos estructural y durabilidad de las fibras no metálicas con finalidad estructural, surge la necesidad de realizar un estudio de la dovela a escala real. Los resultados demuestran la viabilidad de dovelas reforzadas totalmente con fibras de polipropileno (cuantía de 10 kg/m³) como con fibras metálicas (40 kg/m³), demostrando un comportamiento dúctil a partir del ensayo a flexión y a la vez con gran capacidad de redistribuir esfuerzos.

ABSTRACT

The use of the fibre reinforced concrete (FRC) as a construction material has expanded beyond the traditional applications since the publication of design codes and structural guidelines. Fibre reinforced concrete for tunnel lining segments rings is already a standard practice worldwide, where the technical advantages that its use leads are known. Despite of numerous advantages of the FRC, incertitude still exists regarding the design, characterization and performance of these materials.

There are several references in the literature on experimental campaigns reinforced with conventional rebars as reinforced with the partial or total replacement of conventional rebars by structural steel fibres. However, studies on the concept of a sustainable precast tunnel segment, reinforced only with macro-synthetic structural fibres is for the moment very minority, in a few cases barely existing, due to the lack of experience with this type of fibres and the lack of knowledge of the benefits they can offer in a long term. In this context, further research is required to improve current tools to characterize and design nonmetallic FRC structures.

The main topics addressed in this thesis are oriented to: 1. analyse the structural viability of non-metallic structural macro-fibres for tunnel lining segments. 2. Study the durability of plastic fibres against external agents. 3. Establish a design proposal for non-metallic structural fibre-reinforced segments on a real scale.

In order to achieve the objectives of the present doctoral thesis, the first part is focused on the study of the structural viability of non-metallic macro-fibres with a structural purpose. For this purpose, several experimental campaigns are carried out in order to evaluate the characterization of the material, observing the influence on the physical and mechanical properties from the type and content of fibers used in the concrete. Subsequently, the study focuses on quality control at early ages. Finally, this first part is concluded with the development of a new technique capable of determining the fibre content in the nMFRC.

As important as the resistant capacity of the structures, is their ability to resist during their lifetime period of aggressions that the segments are exposed to. Therefore, it has been considered to study the durability of plastic fibres against external agents. As such, an experimental campaign is carried out in which the filament of the non-metallic fibres is subjected to various aggressive environments and exposures in order to characterise the physical and mechanical properties.

Finally, once the structural and durable viability of non-metallic fibres with a structural purpose has been studied, the need to carry out a study of the element on a real scale arises. In this sense, a full-scale study of the segment is carried out, based on the experimental results of the bending test on segments reinforced with polypropylene fibres (10 kg/m^3) and metallic fibres (40 kg/m^3).

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1 - Introducción

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. RAZÓN DE SER.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. Objetivos generales.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	4

Capítulo 2 - Estado del Conocimiento

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	7
2.1. INTRODUCCIÓN.....	7
2.2. COMPORTAMIENTO FENOMENOLÓGICO DEL HRF.....	8
2.3. FIBRAS NO METÁLICAS ESTRUCTURALES.....	9
2.4. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HRF.....	12
2.4.1. Determinación de las propiedades mecánicas del HRF.....	12
2.4.2. Mecanismos de la fluencia en el HRF.....	16
2.4.3. Determinación experimental de la orientación y contenido de fibras.....	16
2.4.4. Coeficiente de Poisson.....	19
2.5. DURABILIDAD.....	20
2.5.1. Durabilidad del hormigón reforzados con fibras no metálicas (HRFnM).....	21
2.5.2. Métodos acelerados para la evaluación de la Durabilidad.....	21
2.6. APLICACIÓN EN ESCALA REAL.....	24

Capítulo 3 - Caracterización del hormigón reforzado con fibras no metálicas

3.	CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS NO METÁLICAS	29
3.1.	INTRODUCCIÓN	29
3.1.1.	Objetivos.....	30
3.1.2.	Organización del estudio	30
3.2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	30
3.2.1.	Plan de trabajo.....	30
3.2.2.	Dosificaciones y materiales	31
3.2.3.	Dosificaciones y materiales	34
3.2.4.	Plan de ensayos	35
3.3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: FASE I.....	42
3.3.1.	Propiedades del hormigón en estado fresco	42
3.3.2.	Velocidad Ultrasónica	43
3.3.3.	Resistencia a Compresión	45
3.3.4.	Módulo de elasticidad.....	46
3.3.5.	Ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007).....	47
3.3.6.	Ensayo Barcelona	49
3.4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: FASE II.....	51
3.4.1.	Propiedades del hormigón en estado fresco	51
3.4.2.	Velocidad Ultrasónica	52
3.4.3.	Determinación de la Densidad y Porosidad del hormigón.....	53
3.4.4.	Resistencia a Compresión	53
3.4.5.	Módulo de elasticidad.....	54
3.4.6.	Ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007).....	54
3.4.7.	Ensayo Barcelona	56
3.5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: FASE III	57
3.5.1.	Propiedades del hormigón en estado fresco	57
3.5.2.	Velocidad Ultrasónica	58
3.5.3.	Determinación de la Densidad y Porosidad del Hormigón	59
3.5.4.	Resistencia a Compresión	59
3.5.5.	Módulo de elasticidad.....	60
3.5.6.	Ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007).....	60
3.5.7.	Ensayo Barcelona	62
3.6.	CRITERIO DE CONSIDERACION DE FIBRAS ESTRUCTURALES MEDIANTE LA NORMATIVA MC-2010.....	63
3.6.1.	Criterio de consideración de fibtas estructurales	64
3.6.2.	Comparativa de resistencias residuales para cada tipo de fibra y cuantía.....	64
3.7.	CONCLUSIONES.....	66

Capítulo 4 - Determinación del coeficiente de Poisson en fibras no metálicas

4.	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE POISSON EN FIBRAS NO METÁLICAS	69
4.1.	INTRODUCCIÓN	69
4.1.1.	Objetivos.....	70
4.1.2.	Organización del estudio	70
4.2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	70
4.2.1.	Selección de fibras.....	70
4.2.2.	Ensayo a tracción.....	71
4.2.3.	Metodología de la determinación del coeficiente de Poisson	73
4.3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	78
4.3.1.	Caracterización mecánica: Ensayo a tracción uniaxial.....	79
4.3.2.	Determinación del coeficiente de Poisson	81
4.3.3.	Validación experimental.....	83
4.4.	CONCLUSIONES.....	85

Capítulo 5 - Control de calidad a edades tempranas

5.	CONTROL DE CALIDAD A EDADES TEMPRANAS.....	87
5.1.	INTRODUCCIÓN	87
5.1.1.	Objetivos.....	88
5.1.2.	Organización del estudio	88
5.2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	88
5.2.1.	Dosificaciones y materiales	89
5.2.2.	Proceso de producción	89
5.2.3.	Preparación de las probetas a edades tempranas	90
5.2.4.	Métodos de caracterización del HRF	91
5.3.	VERIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL HORMIGÓN	91
5.3.1.	Densidad y Resistencia a compresión.....	91
5.3.2.	Comportamiento residual a flexotracción.....	93
5.3.3.	Comportamiento residual en el ensayo Barcelona.....	94
5.4.	CORRELACIÓN ENTRE ENSAYOS	97
5.4.1.	Parámetros obtenidos de la correlación.....	97
5.4.2.	Análisis de los resultados del curado convencional (28 días)	98
5.4.3.	Análisis de los resultados del curado acelerado (7 horas)	99
5.5.	VALIDACIÓN DEL MÉTODO MEDIANTE PROYECTOS PREVIOS.....	101
5.6.	CONCLUSIONES.....	103

Capítulo 6 - Determinación del contenido de fibras no metálicas en HRF

6.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE FIBRAS NO METÁLICAS EN HRF.....	105
----	--	-----

6.1.	INTRODUCCIÓN	105
6.1.1.	Objetivos.....	106
6.1.2.	Organización del estudio	106
6.2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	107
6.2.1.	Dosificaciones y materiales	107
6.2.2.	Métodos de caracterización.....	107
6.2.3.	Proceso de producción	109
6.3.	MEDIDA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA A DOS HILOS	110
6.4.	MEDIDA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA A CUATRO HILOS	116
6.4.1.	Medidas de impedancia eléctrica a partir de la conductividad eléctrica.....	116
6.4.2.	Medidas de impedancia eléctrica a partir de la conductividad iónica.....	122
6.5.	MEDIDA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE MEDIDA CAPACITIVA (C).....	124
6.6.	CONCLUSIONES.....	126

Capítulo 7 - Estudio de durabilidad en macrofibras sintéticas

7.	ESTUDIO DE DURABILIDAD EN MACROFIBRAS SINTÉTICAS	129
7.1.	INTRODUCCIÓN	129
7.1.1.	Objetivos.....	130
7.1.2.	Organización del estudio	130
7.2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	130
7.2.1.	Plan de trabajo	130
7.2.2.	Tipos de fibras seleccionadas	131
7.2.3.	Preparación de las fibras	131
7.2.4.	Disoluciones agresivas empleadas	131
7.2.5.	Configuración del ensayo	132
7.2.6.	Determinación de la resistencia a tracción y módulo elástico.....	135
7.2.7.	Determinación de la microscopía electrónica de Barrido (SEM).....	137
7.2.8.	Determinación de la espectroscopia Raman	137
7.3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	138
7.3.1.	Resistencia a tracción	138
7.3.2.	Módulo de Elasticidad.....	145
7.3.3.	Microscopía electrónica de Barrido	153
7.3.4.	Espectroscopia Raman	156
7.4.	CONCLUSIONES.....	158

Capítulo 8 - Estudio de la dovela a escala real reforzada con fibras estructurales

8.	ESTUDIO DE LA DOVELA A ESCALA REAL REFORZADA CON FIBRAS ESTRUCTURALES.....	161
----	--	-----

8.1.	INTRODUCCIÓN	161
8.1.1.	Objetivos.....	162
8.1.2.	Organización del estudio	162
8.2.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	162
8.2.1.	Elementos a ensayar.....	163
8.2.2.	Materiales empleados.....	163
8.2.3.	Materiales empleados.....	164
8.3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN A ESCALA REAL	165
8.3.1.	Fisuración	165
8.3.2.	Comportamiento a flexión: ancho de fisura.....	167
8.3.3.	Comportamiento a flexión: flecha.....	168
8.4.	SIMULACIÓN DE LAS DOVELAS A ESCALA REAL	169
8.4.1.	Modelo no lineal de elementos finitos	169
8.4.2.	Parámetros para la simulación de la dovela.....	170
8.4.3.	Comparación de los resultados numéricos y los experimentales.....	172
8.5.	CONCLUSIONES.....	174
9.	CONCLUSIONES	177
9.1.	INTRODUCCIÓN	177
9.2.	CONCLUSIONES GENERALES	178
9.3.	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	178
9.3.1.	Evaluación del comportamiento del HRFnM a nivel experimental	178
9.3.2.	Implementación de nuevas técnicas de control de calidad del HRFnM.....	179
9.3.3.	Estudio de la durabilidad frente a agentes externos.....	181
9.3.4.	Propuesta de diseño de la dovela a escala real	181
9.4.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	182
	BIBLIOGRAFÍA	185
	APÉNDICE A – FORMULACIONES DEL HORMIGÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE MEZCLA	195
	APÉNDICE B – CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL HRFnM A EDADES TEMPRANAS.....	201
	NOTACIONES Y SÍMBOLOS.....	205

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Organización de la Tesis Doctoral</i>	4
<i>Figura 2.1 – Elemento de hormigón reforzado con fibras sometido a tracción o flexotracción. (Luis Coto, 2007)</i>	9
<i>Figura 2.2 – Algunos tipos de fibras no metálicas empleadas en el mercado</i>	10
<i>Figura 2.3 – Configuración final del ensayo Barcelona</i>	13
<i>Figura 2.4 – Panel redondo pequeño antes de ser ensayado</i>	14
<i>Figura 2.5 – Fuerza de tracción transversal F_{sp}</i>	15
<i>Figura 2.6 – Configuración del ensayo Montevideo en probeta cúbica</i>	16
<i>Figura 2.7 – Mét. destructivos: Ensayo mecánico a). Análisis de imagen (Nunes, 2017) b). Método de rayo X (Robins et al.,2003) c). Tomografía computarizada (Pujadas, 2013a) d).</i> ..	18
<i>Figura 2.8 – Empleo de fibras</i>	20
<i>Figura 2.9 – Fibra única insertada en una muestra de hormigón (Naaman, 2012)</i>	22
<i>Figura 2.10 – Fases transitorias de carga de las dovelas: desmolde a). transporte b). almacenamiento c). empuje de los gatos d).</i>	25
<i>Figura 3.1 –Proceso de fabricación del hormigón: Colocación de moldes a). Incorporación de las fibras b). compactación de probeta en mesa vibrante c). Probetas fabricadas d).</i>	35
<i>Figura 3.2 – Ensayos en estado fresco del HRF: aire ocluido a). trabajabilidad b)</i>	37
<i>Figura 3.3 – Realización de medidas de velocidad ultrasónica en probetas de HRF</i>	37
<i>Figura 3.4 – Configuración del ensayo de módulo de elasticidad</i>	39
<i>Figura 3.5 – Configuración del ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007)</i>	40
<i>Figura 3.6 – Entalla de una probeta prismática a), probeta prismática ensayada b)</i>	40
<i>Figura 3.7 – Configuración del ensayo Barcelona</i>	41
<i>Figura 3.8 – Etapas que suceden durante el ensayo Barcelona (Pujadas, 2013a)</i>	41
<i>Figura 3.9 – Definición de las etapas ensayo Barcelona a). Desplazamiento de la curva a nuevo origen de referencia b). (adaptada de Pujadas, 2013a)</i>	42
<i>Figura 3.10 – Fibras de Basalto</i>	43
<i>Figura 3.11 – Velocidad ultrasónica de las amasadas de HC y de AR</i>	44
<i>Figura 3.12 – Curva Carga-CMOD: HC 1ª Fase a). AR 1ª Fase b).</i>	47
<i>Figura 3.13 – Curva Carga-desplazamiento axil: HC 1ª Fase a). AR 1ª Fase b).</i>	49
<i>Figura 3.14 – Velocidad ultrasónica de las amasadas de HC y de AR (2ª fase)</i>	52
<i>Figura 3.15 – Curva Carga-CMOD: HC 2ª Fase a). AR 2ª Fase b).</i>	55
<i>Figura 3.16 – Curva Carga-desplazamiento axil: HC 2ª Fase a). AR 2ª Fase b).</i>	56
<i>Figura 3.17 – Velocidad ultrasónica de las amasadas de hormigón de AR (3ª fase)</i>	58
<i>Figura 3.18 – Curva Carga-CMOD del AR 3ª Fase</i>	61
<i>Figura 3.19 – Curva Carga-desplazamiento axil de AR 3ª Fase</i>	62
<i>Figura 4.1 – Muestra del marco textil: dimensiones del marco frontal a). láminas textiles pegadas en la parte posterior b). Fibra adherida a la malla textil c).</i>	72

Figura 4.2 – Procedimiento del ensayo a tracción: Colocación de la muestra a).....	72
Figura 4.3 – Representación esquemática: Fibra pintada de blanca sobre un fondo negro a). Detalle de la interfaz entre la fibra y el fondo b). Cambios en la intensidad de escala de grises ente la fibra y el fondo c).....	74
Figura 4.4 – Configuración final de la fibra previo al ensayo.....	74
Figura 4.5 – Sistema de captura de imágenes: Cámara + flash externo a). Trípode b). Placa deslizante de micro-posicionamiento.	75
Figura 4.6 – Visión detalla de la distancia entre la muestra y la lente de la cámara.....	75
Figura 4.7 – Pasos para evaluar el algoritmo de procesamiento de imágenes.....	76
Figura 4.8 – Curva Carga – deformación de las muestras.....	79
Figura 4.9 – Curva Carga – deformación: grupo superior	80
Figura 4.10 – Típico modo de rotura (PP1) a). Modo de rotura de la fibra sin relieve (PP3) b).	80
Figura 4.11 – Coeficiente de Poisson de las fibras sintéticas evaluadas	81
Figura 4.12 – Configuración del ensayo a). Hilo madre adherido a la malla textil b).	83
Figura 4.13 – Curva Carga – deformación longitudinal del hilo madre	84
Figura 5.1 – Diferentes etapas de la preparación del curado acelerado.....	90
Figura 5.2 – Curva promedio y desviación estándar de la resistencia residual-CMOD del hormigón alta resistencia.....	93
Figura 5.3 – Curva promedio y desviación estándar de la resistencia residual-desplazamiento axial a 7 horas.....	94
Figura 5.4 – Curva promedio y desviación estándar de la resistencia.....	95
Figura 5.5 – Curva real y correlación de UNE-EN 14651 con intervalos de confianza.....	98
Figura 5.6 – Comparación entre la resistencia medida en el UNE-EN 14651 y la resistencia estimada a partir de los resultados BCN con la correlación a 28 días de curado	99
Figura 5.7 – Curva real y correlación de UNE-EN 14651 con intervalos de confianza a 7 horas de curado.....	99
Figura 5.8 – Comparación entre la resistencia medida en el UNE-EN 14651 y la resistencia estimada a partir de los resultados BCN con la correlación a 7 horas de curado	101
Figura 6.1 – Metodología de trabajo para la obtención de las medidas de impedancia eléctrica.....	106
Figura 6.2 – Configuración del ensayo: medida de impedancias a 4w a). Amplificador de instrumentación colocado para las medidas a 4w b). medidas a 2w c). medidas de capacitancia d).	108
Figura 6.3 – Geometría de la muestra y ubicación de los electrodos	110
Figura 6.4 – Vista en perspectiva y dimensionamiento de probetas para: medidas de impedancia eléctrica a 2 y 4 hilos a). medidas de la impedancia eléctrica de una célula de medida capacitiva b).....	110
Figura 6.5 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC: a corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).	111
Figura 6.6 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC: a corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).	112
Figura 6.7 – Relación de Impedancia Eléctrica frente a frecuencias de (100kHz/ 1 kHz): y Tiempo de curado en HC a). y Tiempo de curado en UHPC b). y Contenido de fibras en HC c). y Contenido de fibras en UHPC d).....	114
Figura 6.8 – Resistividad eléctrica a frecuencias de 100 kHz y Cuantía de fibras en: HC a). UHPC b).	115
Figura 6.9 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC: a corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).	117
Figura 6.10 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al UHPC: a corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c)....	118
Figura 6.11 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al: HC de 79d de curado en estado seco a). UHPC de 79d de curado en estado seco b). HC de 93d de curado en estado mojado c). UHPC de 93d de curado en estado mojado d).	119

Figura 6.12 – Relación de Impedancia Eléctrica frente a frecuencias de (100kHz/ 1 kHz): y Tiempo de curado en HC a). y Tiempo de curado en UHPC b). y Contenido de fibras en HC c). y Contenido de fibras en UHPC d).....	120
Figura 6.13 – Resistividad eléctrica a frecuencias de 100 kHz y Cuantía de fibras en: HC a). UHPC b).....	121
Figura 6.14 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al: HC de 127d de curado en estado seco a). UHPC de 127d de curado en estado seco b). HC de 143d de curado en estado mojado c). UHPC de 143d de curado en estado mojado d).	122
Figura 6.15 – Resistividad iónica a frecuencias de 100 kHz y Cuantía de fibras en: HC a). UHPC b).....	123
Figura 6.16 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC de: 3d de curado a). 7d de curado b). 14d de curado c). 28d de curado d).	124
Figura 6.17 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al UHPC de: 3d de curado a). 7d de curado b). 14d de curado c). 28d de curado d).....	125
Figura 7.1 – Esquema de planteamiento de la campaña Experimental	130
Figura 7.2 – Preparación de las bandejas o recipientes.....	133
Figura 7.3 – Campana de gases de la UPC a). Balanza b). Dispositivo de agitación magnética c).....	133
Figura 7.4 – Ataques químicos por Sales en cámara climática a), Ataques químicos por ácidos en campana de gases b), Ataque químico base en horno 40°C c).	134
Figura 7.5 – Muestra guardada posteriormente al primer día de degradación.....	134
Figura 7.6 – Colocación de la fibra de vidrio sobre las fibras a). Fibra de vidrio adherida a la muestra en el extremo b).	135
Figura 7.7 – Colocación de las láminas de aluminio sobre las fibras a). Lámina de vidrio adherida a la muestra en los extremos b).....	136
Figura 7.8 – Colocación del extensómetro en el centro de la fibra.....	136
Figura 7.9 – Configuración del ensayo	137
Figura 7.10 – Equipo de microscopía a utilizar a). Muestras listas para ser tratadas con plata b).....	137
Figura 7.11 – Tensión última de las fibras sometidas a las disoluciones agresivas por sales: Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Sodio (NaSO ₄), y Sulfato de Magnesio (MgSO ₄) a edades de 0, 1 y 60 días.....	139
Figura 7.12 – Tensión última de las fibras sometidas a los ataques por ácidos: Orgánico (Acético CH ₃ COOH), y ácidos minerales (ácido clorhídrico HCl y ácido sulfúrico H ₂ SO ₄) a edades de 0, 1 y 60 días.....	142
Figura 7.13 – Tensión última de las fibras sometida al ataque básico: Hidróxido de sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.....	144
Figura 7.14 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a los ataques por sales: Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Magnesio (MgSO ₄) y Sulfato de Sodio (NaSO ₄) a edades de 0, 1 y 60 días.....	147
Figura 7.15 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a los ataques por ácidos: Orgánico (Acético CH ₃ COOH), y ácidos minerales (ácido clorhídrico HCl y ácido sulfúrico H ₂ SO ₄) a edades de 0, 1 y 60 días.....	150
Figura 7.16 – Módulos de elasticidad de las fibras sometida al medio básico: Hidróxido de sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.....	152
Figura 7.17 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP1 sin atacar, Sal: NaCl 3%, Ácido: H ₂ SO ₄ y Básico: NaOH	153
Figura 7.18 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP2 sin atacar, Sal: NaSO ₄ 5%, Ácido: HCl 10% y Básico: NaOH.....	154
Figura 7.19 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP3 sin atacar, Ácido: HCl 10% y Acético 5%, y Básico: NaOH	155
Figura 7.20 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP8 sin atacar, Ácido: HCl 10% y H ₂ SO ₄ , y Básico: NaOH.....	156

<i>Figura 7.21 – Espectros Raman de la muestra PP1 inicial y en disoluciones agresivas ($\lambda = 633$ nm)</i>	<i>157</i>
<i>Figura 7.22 – Espectros Raman de la muestra PP2 inicial y en disoluciones agresivas ($\lambda = 633$ nm)</i>	<i>157</i>
<i>Figura 7.23 – Espectros Raman de la muestra PP3 inicial y en disoluciones agresivas ($\lambda = 633$ nm)</i>	<i>158</i>
<i>Figura 8.1 – Dimensionamiento de la dovela en vista frontal a). Dovelas listas para ser ensayadas b).</i>	<i>163</i>
<i>Figura 8.2 – Configuración del ensayo a). LVDT colocados con la finalidad de medir el ancho de fisura debida al ensayo a flexión b). Detalle de la zona de los apoyos c).</i>	<i>165</i>
<i>Figura 8.3 – Mapa de fisuración y fotografía de la Dovela: (F) reforzada con fibra metálica a). (P) reforzada con fibra metálica b). (F) reforzada con fibra plástica c). (P) reforzada con fibra plástica d).</i>	<i>166</i>
<i>Figura 8.4 – Curva carga – ancho de fisura en el centro del vano.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 8.5 – Curva carga – desplazamiento en el centro del vano.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 8.6 – Modelo de elementos finitos, malla y condiciones de contorno.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 8.7 – Diagrama constitutivo del comportamiento a compresión y a tracción (Pujadas, 2013b).....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 8.8 – Curvas constitutivas a tracción del hormigón.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 8.9 – Gráfico carga – desplazamiento de las dovelas</i>	<i>172</i>
<i>Figura 8.10 – Tensiones principales y deformaciones plásticas para las cargas de fisuración y rotura (mediante fibras metálicas).....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 8.11 – Tensiones principales y deformaciones plásticas para las cargas de fisuración y rotura (mediante fibras de polipropileno)</i>	<i>174</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 – Objetivos específicos	3
Tabla 2.1 – Características de las fibras (Fernández, 2003).....	10
Tabla 2.2 – Ensayo a flexotracción a partir de distintas normativas Internacionales	12
Tabla 2.3 – Métodos para la determinación de la orientación y contenido de fibras	17
Tabla 2.4 – Varios ejemplos del uso de fibras metálicas para el refuerzo en dovelas	26
Tabla 3.1 – Descripción de las diversas fases de la campaña experimental.	31
Tabla 3.2 – Dosificaciones empleadas en la Campaña experimental.....	32
Tabla 3.3 – Características de las fibras.....	33
Tabla 3.4 – Nomenclaturas de las dosificaciones y contenido y tipo de fibra específico	34
Tabla 3.5 – Plan de ensayos a nivel probeta (Propiedades físicas y mecánicas).....	36
Tabla 3.6 – Normativas seguidas para la caracterización en estado fresco HRF.....	36
Tabla 3.7 – Calidad del hormigón en función de su vel. ultrasónica (Tobio, 1967).....	38
Tabla 3.8 – Propiedades del HC y AR en estado fresco.....	42
Tabla 3.9 – Caracterización a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días (1ª fase).....	45
Tabla 3.10 – Caracterización del módulo elástico (E_{cm}) a los 7 y 28 días (1ª fase).....	47
Tabla 3.11 – Resultados ensayo flexotracción hormigón Convencional (1ª Fase).....	48
Tabla 3.12 – Resultados ensayo flexotracción hormigón Alta resistencia (1ª Fase)	48
Tabla 3.13 – Resultados ensayo Barcelona para un desplazamiento de pistón.....	50
Tabla 3.14 – Propiedades del HC y AR en estado fresco (2ª fase).....	51
Tabla 3.15 – Resultados de la densidad seca y aparente (g/m^3) y porosidad accesible.....	53
Tabla 3.16 – Caracterización a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días (2ª fase).....	53
Tabla 3.17 – Caracterización del módulo elástico (E_{cm}) a los 7 y 28 días (2ª fase).....	54
Tabla 3.18 – Resultados ensayo flexotracción HC y AR (2ª Fase).....	55
Tabla 3.19 – Resultados ensayo Barcelona para un desplazamiento.....	57
Tabla 3.20 – Propiedades del AR en estado fresco (3ª fase).....	57
Tabla 3.21 – Resultados de la densidad seca y aparente (g/m^3) y porosidad.....	59
Tabla 3.22 – Caracterización a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días (3ª fase).....	59
Tabla 3.23 – Caracterización del módulo elástico (E_{cm}) a los 7 y 28 días (3ª fase).....	60
Tabla 3.24 – Resultados ensayo flexotracción hormigón Alta Resistencia (3ª fase).....	62
Tabla 3.25 – Resultados ensayo Barcelona para un desplazamiento.....	63
Tabla 3.26 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras.....	65
Tabla 3.27 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras.....	65
Tabla 3.28 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras.....	65
Tabla 3.29 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras estructurales o no correspondiente a la fibra PP4.....	66
Tabla 4.1 – Características de las fibras.....	71
Tabla 4.2 – Resultados de la tensión y deformación última de las fibras.....	79
Tabla 4.3 – Resultados del coeficiente de Poisson de las fibras sintéticas evaluadas.....	81

Tabla 4.4 – Resultados de la deformación longitudinal y error de medición.....	84
Tabla 4.5 – Error de medida del coeficiente de Poisson.....	85
Tabla 5.1 – Dosificación del hormigón empleado.....	89
Tabla 5.2 – Preparación de ensayos previstos.....	91
Tabla 5.3 – Resultados de la densidad.....	92
Tabla 5.4 – Valores de resistencia a compresión a 7 horas y 28 días.....	92
Tabla 5.5 – Resultados a flexotracción tras los 28 días de curado.....	94
Tabla 5.6 – Resultados del ensayo Barcelona tras 7 horas de curado acelerado.....	95
Tabla 5.7 – Resultados del ensayo Barcelona tras 28 días de curado.....	96
Tabla 5.8 – Parámetros del ajuste para los diferentes valores del CMOD.....	98
Tabla 5.9 – Experiencias internacionales de túneles con dovelas prefabricadas de anillos de revestimiento.....	103
Tabla 6.1 – Dosificación de las mezclas de hormigón.....	107
Tabla 6.2 – Módulo de impedancia eléctrica del HC a frecuencia de 100 Hz.....	111
Tabla 6.3 – Módulo de impedancia eléctrica del UHPC a frecuencia de 100 Hz.....	113
Tabla 6.4 – Módulo de impedancia eléctrica del HC a frecuencia de 100 Hz.....	117
Tabla 6.5 – Módulo de impedancia eléctrica del UHPC a frecuencia de 100 Hz.....	118
Tabla 7.1 – Fibras seleccionadas.....	131
Tabla 7.2 – Disoluciones agresivas empleadas en las fibras.....	132
Tabla 7.3 – Valores de la tensión última suministrados por los fabricantes y de las diferentes muestras ensayadas en el laboratorio.....	138
Tabla 7.4 – Tensión última de las fibras sometidas a cloruro de sodio [NaCl].....	141
Tabla 7.5 – Tensión última de las fibras sometidas a Sulfato de Sodio [NaSO ₄].....	141
Tabla 7.6 – Tensión última de las fibras sometidas a Sulfato de Magnesio [MgSO ₄].....	141
Tabla 7.7 – Tensión última de las fibras sometidas a ácido Acético [CH ₃ COOH].....	143
Tabla 7.8 – Tensión última de las fibras sometidas a ácido Clorhídrico [HCl].....	144
Tabla 7.9 – Tensión última de las fibras sometidas ácido Sulfúrico [H ₂ SO ₄].....	144
Tabla 7.10 – Tensión última de las fibras sometidas a Hidróxido de sodio [NaOH].....	145
Tabla 7.11 – Valores de los módulos de elasticidad suministrados por los fabricantes y de las diferentes muestras ensayadas en el laboratorio.....	146
Tabla 7.12 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a cloruro de sodio [NaCl].....	148
Tabla 7.13 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a Sulfato de Sodio [NaSO ₄].....	148
Tabla 7.14 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a Sulfato de Magnesio [MgSO ₄].....	149
Tabla 7.15 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a ácido Acético [CH ₃ COOH].....	151
Tabla 7.16 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a ácido Clorhídrico [HCl].....	151
Tabla 7.17 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a ácido Sulfúrico [H ₂ SO ₄].....	151
Tabla 7.18 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a Hidróxido de sodio [NaOH].....	152
Tabla 8.1 – Características de las fibras.....	164
Tabla 8.2 – Propiedades mecánicas de los HRF empleados.....	171

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, las dovelas prefabricadas de hormigón en túneles se reforzaban con armadura convencional para resistir las solicitaciones en las fases transitorias de producción y montaje, por ello, las dovelas se sobredimensionaban para cumplir con las resistencias exigidas en estados iniciales. Con el objetivo de racionalizar el armado en dovelas de revestimiento, para así conducir a mejoras en el comportamiento mecánico (tanto en las fases transitorias de producción y montaje), se ha introducido el empleo del hormigón reforzado con fibras (HRF).

El HRF es hoy en día muy utilizado en la ingeniería civil debido a la posibilidad de reducir o sustituir el hormigón armado tradicional (Caratelli *et. al.*, 2011; EHE-08). El empleo de este tipo de hormigón permite obtener importantes ventajas en términos de rendimiento estructural y reducción de costes. Debido a esas ventajas, el uso de las fibras estructurales contribuye a la sustitución del refuerzo tradicional, acelerando el proceso de producción y aumentando la competitividad del HRF.

En los últimos años hasta la actualidad ha existido un creciente interés en utilizar el HRF en dovelas de túneles para prefabricados (de la Fuente *et al.*, 2014). En los países anglosajones, especialmente en el Reino Unido y Australia, es cada vez más frecuente la sustitución de la armadura convencional por fibras metálicas y se empieza a plantear el uso

de fibras no metálicas. La utilización de fibras no metálicas es por el momento muy minoritaria (existiendo pocos ejemplos de la fabricación de dovelas con fibras no metálicas en el mundo) debido a la falta de experiencia con este tipo de fibras y al desconocimiento de los beneficios que pueden ofrecer a largo plazo. Sin embargo, en la literatura técnica y otras investigaciones se demuestra que la adición de fibras no metálicas en particular las fibras sintéticas, puede lograr una mejora a la resistencia a flexión, resistencia al impacto y comportamiento a la fatiga (Buratti *et al.*, 2011; Cengiz & Turanli, 2004).

El reto fundamental de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de un nuevo concepto de dovela prefabricada de finalidad estructural y de alta durabilidad con fibras estructurales no metálicas. El desarrollo del material contribuirá a una mayor eficiencia de los procesos, optimizando y mejorando el producto final en términos estructurales, reduciendo costes, permitiendo una mejora sustancial en la sostenibilidad. Para que el salto tecnológico sea viable se ha de analizar la caracterización del material en distintos ámbitos y un estudio de la durabilidad. Conviene destacar que la presente Tesis Doctoral forma parte del proyecto I+D DURADOV “Desarrollo de dovelas de HRF no metálicas de alta durabilidad y sostenibilidad mejorada”.

1.2. RAZÓN DE SER

El empleo de las fibras estructurales no metálica ha establecido un creciente interés en el sector de hormigones reforzado con fibras (HRF), dadas las ventajas técnicas que ofrece como la reducción de las operaciones de montaje y su ventaja económica asociado a la reducción de costes. Si bien el uso del hormigón reforzado con fibras metálicas (HRFM) para dovelas de anillos de revestimiento de túneles actualmente es una práctica habitual a nivel mundial, son pocos los estudios de dovelas con fibras no metálicas (macrofibras sintéticas) (Bostr, 2006; Conforti, Tiberti, Plizzari, Caratelli, & Meda, 2017; Kaundinya, 2005).

Las razones que motivan ese escaso uso es debido a que en la actualidad aún existe cierta reticencia al empleo de HRFnM con responsabilidad estructural como alternativa al refuerzo clásico, debido a la falta de experiencia y el desconocimiento de sus limitaciones y campos de aplicación. El motivo principal se debe a una incomprensión del comportamiento estructural del material, aunque más frecuentemente la causa de ello ha sido que, al comparar entre materiales, tan solo se ha tenido en cuenta los costes directos de los materiales y se han obviado los costes indirectos y los factores sociales y medioambientales.

Lo cierto es que en los últimos años se han incrementado la publicación de guías y normativas para el dimensionamiento de dovelas armadas con fibras, donde a nivel nacional, el Anejo 14 de la instrucción EHE-08 ya plantea unas guías para hacer frente a estos campos y, adicionalmente, el Código Modelo 2010 también presenta una guía para el diseño de estructuras de HRF (de la Fuente, et al., 2014). Con la intención de aportar una mayor durabilidad y sostenibilidad, se ha querido dar un paso más en esta tecnología de materiales y reforzar las dovelas únicamente con fibras no metálicas. En este contexto, para evaluar su viabilidad, es necesario estudiar las exigencias estructurales y durables en este tipo de elemento.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos generales

Teniendo en cuenta las motivaciones y las áreas de interés presentadas en el apartado anterior, los objetivos principales de la presente tesis doctoral se definen de la siguiente manera:

- Evaluar la viabilidad estructural de las macrofibras no metálicas con finalidad estructural destinadas al uso en dovelas de revestimiento de túneles.
- Estudiar la durabilidad de las fibras plásticas frente a agentes externos.
- Establecer una propuesta de diseño de Dovelas reforzadas con fibras con finalidad estructural no metálicas a escala real.

1.3.2. Objetivos específicos

En aras de cumplir con los objetivos generales, se proponen una serie de objetivos específicos. La Tabla 1.1 presenta los principales objetivos específicos asociados a cada uno de los objetivos generales.

Tabla 1.1 – Objetivos específicos

Temas	Objetivos específicos
Evaluación del comportamiento del HRFnM destinadas al uso en Dovelas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Establecer, obtener y analizar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas. ▪ Determinar la optimización del contenido de fibras en el hormigón destinado al uso de dovelas. ▪ Analizar y conocer la respuesta estructural de los distintos tipos de hormigones, considerando un diseño de dosificación y contenido de fibras establecido. ▪ Determinar el coeficiente de Poisson en un número de macrofibras estructurales.
Control de Calidad y desarrollo de nuevas técnicas para determinar el contenido de fibras en HRFnM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudiar la influencia de las edades tempranas en el HRFnM. ▪ Obtener una correlación efectiva entre el ensayo Barcelona y el ensayo a flexotracción, tanto para los resultados en muestras de curado estándar como de curado acelerado. ▪ Proponer un método para determinar el contenido de fibras. ▪ Verificar si la metodología seleccionada permite diferenciar entre contenidos de fibras.
Estudio de la durabilidad de las fibras no metálicas frente a agentes externos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar los agentes físicos y químicos que pueden afectar a la durabilidad de las fibras no metálicas. ▪ Establecer las propiedades físicas y mecánicas que definen el comportamiento de las fibras plásticas. ▪ Evaluar la pérdida de las propiedades físicas y mecánicas en función del tiempo de inmersión en los diferentes agentes externos.
Estudio de la dovela reforzada con fibras estructurales a escala real	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Obtener resultados experimentales del ensayo a flexión en Dovelas a Escala real, reforzadas exclusivamente con fibras de polipropileno y fibras metálicas. ▪ Analizar el comportamiento global del ensayo a flexión. ▪ Simular el comportamiento a flexión de las dovelas reforzadas con fibras, considerando el modelo constitutivo del MC-2010

1.4. METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La presente Tesis Doctoral se ha dividido en nueve capítulos que tratan de las diferentes etapas del diseño y alta durabilidad del hormigón reforzado con fibras no metálicas. La Figura 1.1 presenta la metodología seguida de la Tesis Doctoral mediante una representación esquemática, donde se divide en cinco partes.

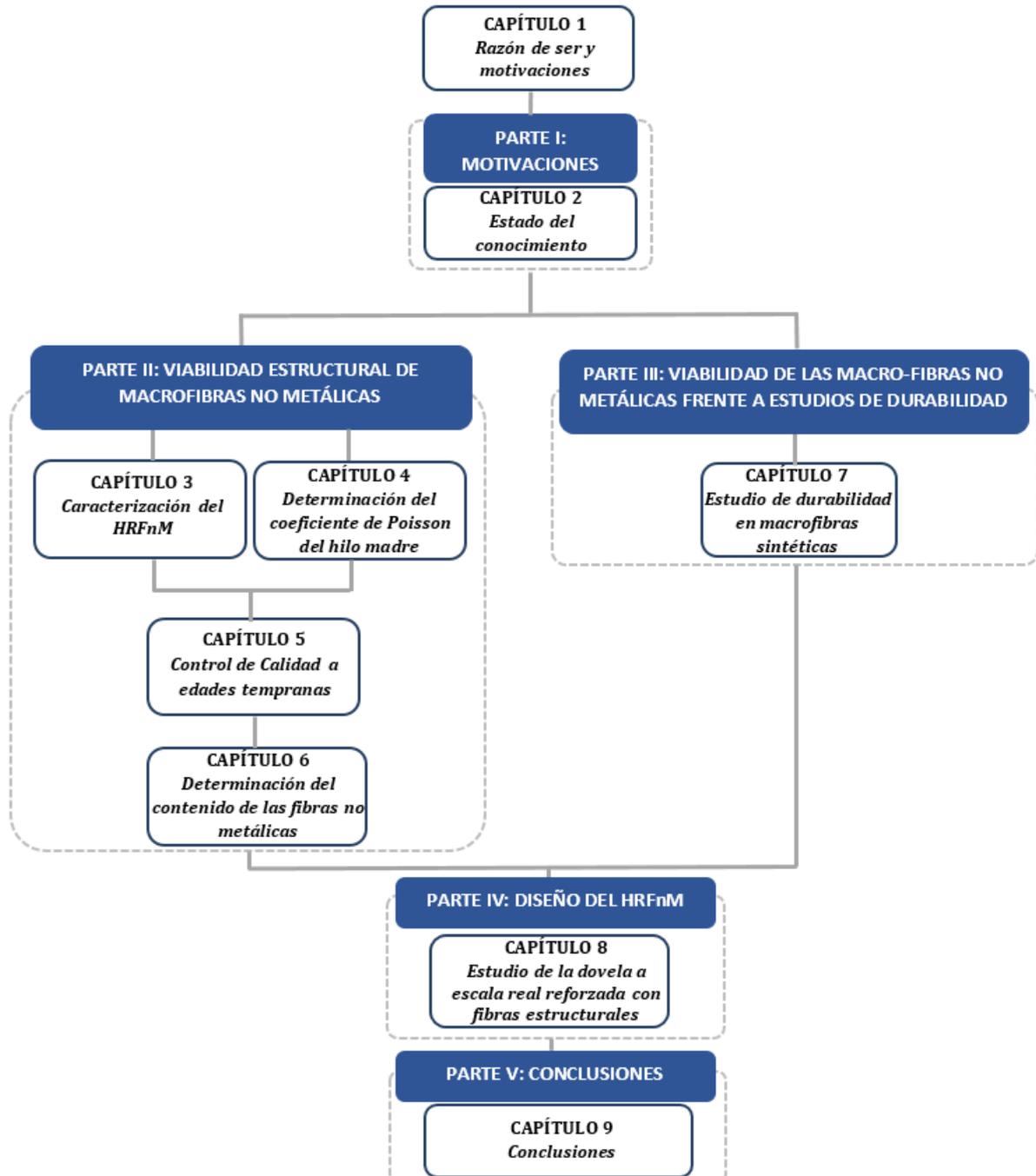


Figura 1.1 – Organización de la Tesis Doctoral

La PARTE I corresponde al Estado del Conocimiento y se presenta en el *Capítulo 2*. El Estado del Conocimiento abarca una pormenorizada síntesis acerca del HRFnM con

especial enfoque a las fibras derivadas de la poliolefina y su empleo en dovelas prefabricadas como sistema de revestimiento en túneles. En él se abarcan los métodos para la caracterización el HRF, los estudios de la Durabilidad y finalmente el empleo de este tipo de hormigón en escala real.

La PARTE II engloba los *Capítulos del 3-6* y está enfocada al estudio de la viabilidad estructural de las macrofibras no metálicas con finalidad estructural. En esta parte se han realizado dos campañas experimentales, la primera corresponde al *Capítulo 3* que abarca el estudio exhaustivo de la caracterización del hormigón reforzado con distintos tipos de fibras no metálicas. La segunda parte corresponde al *Capítulo 4* el cual aborda una caracterización del comportamiento de las fibras a partir del estudio del coeficiente de Poisson.

A partir de los resultados experimentales observados en el *Capítulo 3 y 4*, surge la necesidad de estudiar el control de calidad a edades tempranas del hormigón (*Capítulo 5*), a partir de la maduración del hormigón a edades tempranas. Por otra parte, el *Capítulo 6* presenta, evalúa y compara varios prototipos basados en mediciones de impedancia eléctrica, creadas para determinar de forma indirecta la determinación del contenido de las fibras no metálicas dentro del hormigón. Para ambas campañas experimentales (*Capítulo 5 y 6*) se ha empleado un hormigón reforzado con el tipo de fibra no metálica con mejores prestaciones presentadas en los capítulos anteriores.

Tan importante como la capacidad resistente de las estructuras, es su capacidad para resistir durante su período de vida útil a las agresiones que las dovelas están expuestas. Por ello, se ha considerado dedicar la PARTE III de la presente Tesis, al estudio de la durabilidad de las fibras plásticas frente a agentes externos. El *Capítulo 7* se realiza a partir de una campaña experimental en la que se somete el hilo madre de las fibras no metálicas a diversos ambientes agresivos y exposiciones y así caracterizar las propiedades físicas y mecánicas.

Por otro lado, una vez estudiado la viabilidad en términos estructural y de durabilidad de las fibras no metálicas con finalidad estructural, surge la necesidad de realizar un estudio a escala real. En este sentido la PARTE IV presenta el *Capítulo 8*, donde se realiza un estudio a flexión de la dovela a escala real, armada únicamente de fibras estructurales (derivadas de la poliolefina y de acero).

Finalmente, la PARTE V engloba el *Capítulo 9*, donde se exponen las conclusiones más relevantes del trabajo realizado, y a partir de ellas presentan las líneas futuras en aras de profundizar y ampliar la investigación realizada en esta tesis.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

Unos de los métodos de construcción de túneles más empleados y conocido es mediante perforación y tronadora (Karliński *et al.*, 2008; Suorineni *et al.*, 2008; Zare & Bruland, 2006), siendo la técnica “Tunnel Boring Machine” TBM la metodología más avanzada para la construcción de túneles con extensiones superiores a 20 km en línea recta. (Burgers & Walraven, 2007; Conforti *et al.*, 2019; di Prisco M. *et al.*, 2015; Yazdani-chamzini & Haji, 2012)

El número de túneles construidos con tuneladora (TBM – Tunnel Boring Machine) ha aumentado considerablemente en los últimos años como consecuencia de los avances tecnológicos desarrollados en estas máquinas y en el propio proceso constructivo, siendo España un ejemplo notable a nivel mundial, donde entre 1996 y 2011 se han construido 405 km de túneles mediante este sistema constructivo. Así, actualmente, es posible construir túneles con un elevado rendimiento de excavación, atendiendo a los estándares de seguridad incluso bajo las condiciones de trabajo más desfavorables como, por ejemplo, en las zonas urbanas o en zonas bajo condiciones geotécnicas muy difíciles.

Con el fin de garantizar la estabilidad del túnel, se utiliza un sistema físico, compuesto por elementos individuales llamados dovelas que se unen entre sí para formar un anillo. Las dovelas o segmentos prefabricados se conocen como losas de hormigón reforzado con forma curva, que por lo general presentan formas trapezoidales o

rectangulares. En la actualidad, el sistema de armado en dovelas más conocido es el de armadura pasiva convencional (barras de acero), a la vez la implementación de fibras se ha extendido tanto en la sustitución total de las barras de acero, como el empleo de una combinación de ambos.

El uso del hormigón reforzado con fibras (HRF) para dovelas de revestimiento de túneles ya es conocido como una práctica a nivel mundial, donde su uso como material estructural ha sido aceptado por la Instrucción del hormigón estructural (EHE-2008) *Anejo 14* y por el actual Código modelo de la *fib* (2010). Las ventajas del empleo de las fibras (reducción de costes, tiempos de ejecución, riesgos asociados al empleo de ferrallas, entre otros.) ha conducido a la masificación de su empleo en dovelas como elemento de refuerzo para el hormigón complementario de las barras; incluso, en algunos casos, como único elemento de refuerzo.

Teniendo esto en cuenta, se realiza un estudio bibliográfico sobre los temas tratados en las distintas líneas de investigación presentadas en la introducción. A consecuencia de dicho estudio, se presenta un breve estado del conocimiento referente a un nuevo concepto de dovela prefabricada de alta durabilidad, armada únicamente con fibras estructurales no metálicas, donde se tomará en cuenta la caracterización, estudios de durabilidad y ensayos de control referente al HRF.

2.2. COMPORTAMIENTO FENOMENOLÓGICO DEL HRF

A la hora de analizar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras surgen incertidumbres sobre el comportamiento el cual se debe esperar, y sobre todo de qué forma contribuyen cada uno de los componentes. Por tanto, teniendo en cuenta que se está hablando de hormigón reforzado con fibras, los materiales que lo componen serán los que darán el comportamiento mecánico al compuesto.

En el caso del hormigón, el comportamiento a tracción o a flexotracción se debe al comportamiento mecánico que puede tener la pasta de cemento y los áridos agregados, es decir, depende de la naturaleza de los materiales que lo componen, que en este caso son materiales frágiles. En el caso de las fibras embebidas en el hormigón, hay que tener en cuenta que el comportamiento de éstas no será el mismo que se tiene en el hormigón reforzado con una barra de acero o si se tuviera sólo una fibra embebida.

Sabiendo que el uso de las fibras estructurales en el hormigón conduce a una mejora del comportamiento resistente de la matriz cuando está sometida a tensiones de tracción (de la Fuente *et al.*, 2014; di Prisco & Plizzari, 2009; Walraven, 2009). La Figura 2.1 presenta en la gráfica de un hormigón reforzado con fibras, sometido a tracción o flexotracción, donde es racional observar que cuando se inicia la carga, el hormigón es el que toma dicha carga, y por ende el trabajo de la fibra durante esta fase se considera mínimo o nulo, luego cuando la matriz de hormigón se inicia a fisurar, entonces empieza a transmitirle carga a las fibras, hasta que finalmente son las fibras las que prácticamente absorben la totalidad de las tensiones.

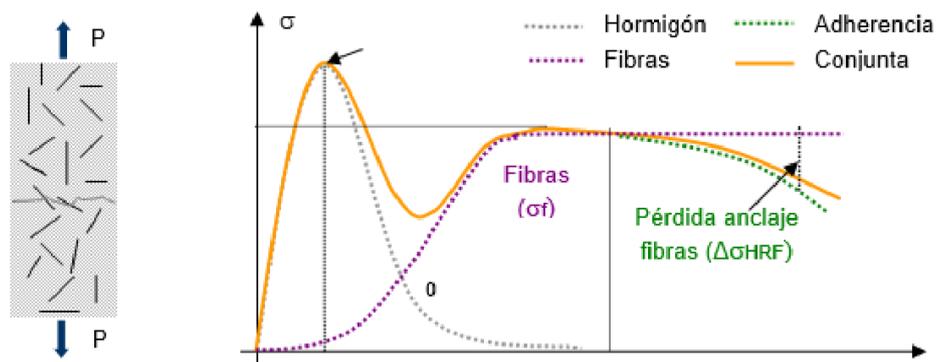


Figura 2.1 – Elemento de hormigón reforzado con fibras sometido a tracción o flexotracción. (Luis Coto, 2007)

La Figura 2.1 demuestra que la tensión del hormigón reforzado con fibras es, la suma de la contribución del hormigón con la contribución de las fibras. También hay que tener en cuenta que cuando se llega a una determinada deformación, se inicia una fase de descarga en el que el elemento estudiado aumenta su deformación a una tensión cada vez menor. Esta fase de descarga representa la pérdida de anclaje entre las fibras y el hormigón, que acaba produciendo un deslizamiento de la fibra hasta que finalmente se produce la rotura final de la probeta.

Así pues, el comportamiento de un material compuesto como es el hormigón reforzado con fibras depende del comportamiento de la matriz de hormigón, de las fibras que están embebidas en el hormigón, y de la interacción entre ambos (Luis Coto, 2007).

2.3. FIBRAS NO METÁLICAS ESTRUCTURALES

En los últimos años los crecientes esfuerzos de la industria se han dirigido al desarrollo de una nueva generación de fibras no metálicas con finalidad estructural. Estos materiales aún no se han estudiado en tanta profundidad como se han investigado las fibras de acero.

De acuerdo con Naaman (2003), garantiza que para que una fibra trabaje de forma eficiente, el material debe presentar alta resistencia a tracción, resistencia a la adherencia con la matriz del mismo orden o en su defecto superior a la resistencia a tracción de la matriz, un módulo elástico superior al de la matriz y finalmente debe presentar un coeficiente de Poisson y coeficiente de dilatación térmica preferiblemente semejante al de la matriz. Independientemente del tipo de fibra utilizada, existen numerosos factores de los que depende la eficacia del refuerzo de fibras, entre los que cabe destacar: el material constitutivo, la geometría, las propiedades de la interfaz entre la pasta de cemento y la fibra (Alberti, Enfedaque, & Gálvez, 2016).

Las fibras no metálicas empleadas en el HRF se pueden clasificar según su naturaleza como fibras poliméricas e inorgánicas. Las fibras poliméricas están fabricadas de polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, poliéster,

nylon entre otras. Mientras que la fibra inorgánica más conocida es la fabricadas de vidrio. Por otro lado, las fibras se dividen dos tipos: las microfibras y las macrofibras.

Las microfibras, que pueden ser monofilamentos o fibriladas, se caracterizan por ser destinadas a evitar la fisuración del hormigón en estado fresco. Las más conocidas son las fibras de polipropileno, donde sus dosificaciones son muy bajas pero lo suficientemente eficientes para prevenir la fisuración del hormigón por retracción plásticas. Sin embargo, las macrofibras están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho de la fisura si se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada.

Por lo tanto, existe una alta variedad de fibras, pudiendo variar su material, geometría y sus propiedades. En la Figura 2.2 y la Tabla 2.1 se pueden apreciar algunas fibras que comúnmente se ven en el mercado para morteros y hormigones, junto a algunas de sus propiedades.

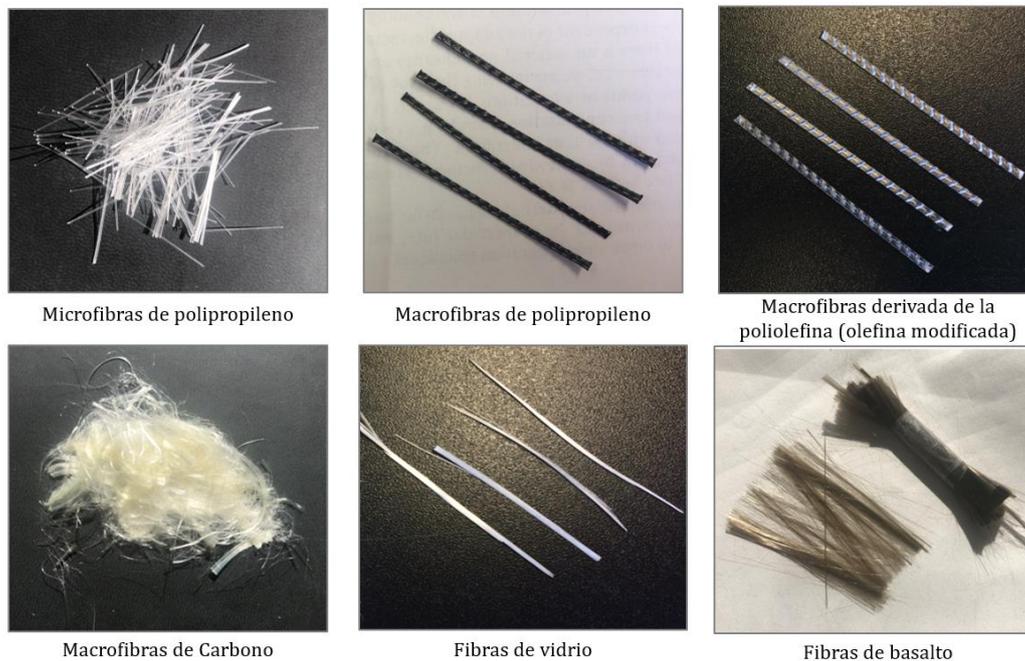


Figura 2.2 – Algunos tipos de fibras no metálicas empleadas en el mercado

Tabla 2.1 – Características de las fibras (Fernández, 2003)

Tipo de fibra	Resistencia a tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Densidad [kg/m ³]	Alargamiento de rotura [%]
Vidrio	2000	60	2700	3,6
Carbono	3000	200-500	1900	0,5
Nilon	900	4	1100	13,0-15,0
Polipropileno	400-800	5-25	900	8,0-20,0
Poliester	700-900	8,2	1400	11,0-13,0
Hormigón	5-8	30	2300	-

La Tabla 2.1 presenta las variaciones entre las propiedades de cada fibra y las del hormigón. Consecuentemente las fibras plásticas, no son mecánicamente tan eficientes como las fibras de acero, sin embargo, existe una amplia gama de fibras y una gran variedad de geometrías en el mercado. Las fibras derivadas de la poliolefina (las más comunes en el

mercado) pueden alcanzar resistencias a tracción muy altas, pero sin embargo presentan generalmente bajos módulos elásticos. Sí existen fibras de alto módulo elástico como PVA o Kevlar, si bien son relativamente caras (Pujadas, 2013a).

Existen en la literatura técnica trabajos e investigaciones en las que se demuestra que con la adición de fibras sintéticas se logra mejorar significativamente la resistencia a flexión, resistencia al impacto y comportamiento a la fatiga (Buratti *et al.*, 2004; Cengiz & Turanli, 2004). Entre otras ventajas, al igual que las fibras de acero se puede mencionar:

- Control de fisuración. Permiten una formación controlada de las fisuras y llevan al hormigón a un comportamiento dúctil después de la fisuración inicial, evitando así la fractura frágil.
- Provee una excelente resistencia a la corrosión ya que controla la abertura de fisura y por consiguiente la entrada de agua.
- Incremento de la resistencia a la agresividad de los cloruros y sulfuros debido a una reducción de la fisuración.
- Mejora la resistencia a tracción, flexión y corte, produciendo un aumento de la capacidad portante.
- Proporciona una capacidad adicional de resistencia debida a la redistribución del momento plástico en caso de sollicitaciones dinámicas.
- Provee un refuerzo uniforme en las tres direcciones, convirtiéndolo en un material isótropo y homogéneo, con igual rendimiento en todas las direcciones
- Debido a las características isotrópicas y a la repartición uniforme de fibras en toda la estructura, es ideal para cargas sin punto de aplicación definida.
- Permite ahorros de material conservando las mismas propiedades.

Por otra parte, el empleo de las fibras de acero presenta ciertas desventajas, que no repercuten al empleo de las fibras sintéticas, entre ellas se puede mencionar:

- La posibilidad de corrosión de la fibra metálica condiciona la durabilidad del elemento estructural, al no ser posible jugar con el recubrimiento de hormigón, llevando a incrementos en el consumo de cemento para crear matrices cementicas más impermeables a la entrada de agentes agresivos.
- Tienen un coste sensiblemente mayor a las fibras no metálicas, variando mucho con las fluctuaciones en el precio del acero.
- No pueden garantizar la seguridad del elemento frente al fenómeno del *spalling* que pueda tener lugar por acción del fuego.

2.4. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL HRF

2.4.1. Determinación de las propiedades mecánicas del HRF

Se conoce por el ensayo de tracción uniaxial al que proporciona directamente los parámetros más relevantes respecto al comportamiento a tracción en régimen postfisuración del HRF. Según el procedimiento descrito por las recomendaciones de la RILEM (Barr *et al.*, 2003) sugiere el uso de una muestra cilíndrica con una entalla circunferencial en el centro y tres extensómetros montados a través de la entalla para medir el desplazamiento de la abertura de fisura.

A pesar de que el ensayo proporciona los parámetros relevantes para la determinación del comportamiento postfisuración del HRF, dicho ensayo presenta dificultades técnicas que influyen a los resultados obtenidos (Galeote, 2018; Pujadas, 2013a). La heterogeneidad del material, las imperfecciones de la muestra, las excentricidades durante el proceso de carga y la rotura de la muestra por los extremos, son las dificultades comunes para este tipo de ensayo.

Existen normativas y códigos de referencias que plantean el uso de diferentes ensayos para la caracterización del hormigón reforzado con fibras, siendo el ensayo a flexotracción sobre probeta prismáticas el más utilizado.

a) Ensayo a flexotracción

De manera general, el ensayo a flexotracción presenta dos variaciones en relación a su configuración y ejecución. Estas variaciones se basan en el número de puntos de aplicación de la carga para llevar el material a rotura y la incorporación de la entalla o no en el centro de la muestra. La Tabla 2.2 presenta las diferentes normativas existentes, en donde expone el tipo de ensayo y la configuración de la misma a partir de las normativas Europeas existentes.

Tabla 2.2 – Ensayo a flexotracción a partir de distintas normativas Internacionales

Tipo de Ensayo	Normativa	Configuración del ensayo
Ensayo de flexotracción a tres puntos	UNE EN 14651	
	RILEM TEST	
Ensayo de flexotracción a cuatro puntos	NBN B 15-238	
	DIN 1048	
	UNI 11039	
	ASTM C-1609	

La normativa española (UNE-EN 14651:2007) y las recomendaciones de la RILEM optan por el empleo del ensayo a tres puntos *three-point bending test* sobre probetas prismáticas, con carga en el centro y entalla. Aunque la entalla disminuye la dispersión del ensayo, si influye el comportamiento estructural forzando la aparición de las fisuras en la sección. Sin embargo, no corresponde a la sección más débil, y, por ende, en algunos casos podría alcanzar mayores resistencias residuales que aquellos sin entallas (Lappa, 2007).

Por otra parte, la norma belga (IBN. NBN B 15-238, 1992), la alemana (DIN 1048-5:1991), la italiana (UNI 11039, 2003) y la americana (ASTM C1609, 2007) optan por el empleo del ensayo de flexotracción a cuatro puntos *four-point bending test* aplicando dos cargas puntuales a tercios de los apoyos y sin el empleo de la entalla.

b) Ensayo Barcelona

El Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) desarrolló el Ensayo Barcelona para la determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción (Molins *et al.*, 2009), a partir del ensayo de doble punzonamiento (“Double Punching-test” o DPT) ideado por (W. F. Chen, 1970), para la determinación de la resistencia a tracción indirecta del hormigón convencional.

El ensayo Barcelona se plantea como alternativa al ensayo de flexotracción. Este ensayo también permite la caracterización del comportamiento del HRF. Por ello, el ensayo Barcelona ha demostrado ser adecuado para el control sistemático de HRF en obra (Saludes, 2007). A pesar de sus pequeñas dimensiones, las probetas usadas presentan una alta superficie específica de fractura que permite obtener valores representativos de la resistencia y de la tenacidad del material, con un coeficiente de variación medio inferior al 13%, valor que es considerablemente menor a los alcanzados con otras metodologías experimentales (Molins *et al.*, 2009).

La normativa (UNE-EN 83515:2010) consiste en la transmisión de una carga a compresión uniaxial sobre muestras cilíndricas de dimensión de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura, mediante dos punzones metálicos, colocados concéntricamente en la parte superior e inferior de la probeta. Del mismo modo, se emplea una cadena extensométrica situada a media altura de la probeta para determinar la deformación circunferencial (*Total Circumferential Opening Displacement, TCOD*), como se muestra en la Figura 2.3a.

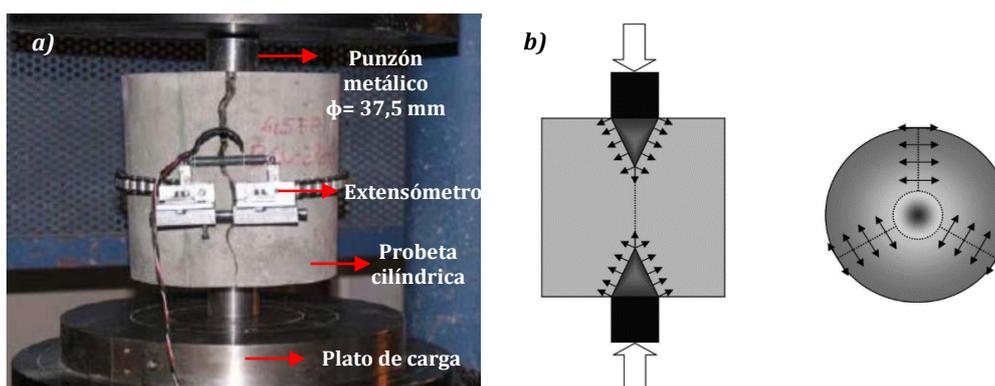


Figura 2.3 – Configuración final del ensayo Barcelona

a). Cuñas de compresiones y esfuerzos de tracción desarrollados en un cilindro sometido a doble punzonamiento b). (Carmona *et al.*, 2009)

Durante el ensayo, las cargas aplicadas a través de los punzones metálicos generan tensiones de tracción concéntricas, desde el eje de la probeta hacia el exterior y al alcanzar la resistencia a tracción del hormigón, se produce la rotura de la probeta según los planos de fisuración radial (Pujadas, 2013a). Bajo la carga de rotura se forman dos cuñas cónicas situadas debajo de los punzones (Figura 2.3b). Debido a la concentración de tensiones en

planos concéntricos, en el momento de la rotura se producen grietas radiales perpendiculares a este campo de tensiones. Las grietas se propagan desde el centro de la probeta, específicamente desde el borde formado por el punzón de acero hacia el manto del cilindro (Carmona *et al.*, 2009).

La carga unitaria de fisuración f_{ct} correspondiente al máximo obtenido en el diagrama carga-deformación y la resistencia residual a tracción del hormigón f_{ctRx} se calcula según la siguiente expresión:

$$f_{ct} = \frac{4 P_f}{9 \pi a H}, f_{ctRx} = \frac{4 P_{Rx}}{9 \pi a H} \quad [2-1]$$

Donde P_f corresponde a la carga que produce la fisuración, a y H son las dimensiones de las probetas definidas en (UNE-EN 83515:2010), y el P_{Rx} corresponde a la carga correspondiente a una deformación circunferencial total R_x .

c) Ensayo de panel redondo pequeño SRDP (*Small round determinate Panel*)

Los ensayos de panel tanto redondos como cuadrados (Bernard, 2000), inicialmente han sido desarrollados para la determinación de la absorción de energía del HRF en aplicaciones para el hormigón proyectado. El SRDP es conocido como adecuado para la caracterización mecánica, ya que, debido a su geometría y dimensión, la dispersión en los resultados varía entre el 10% y el 25%, pudiendo ser valores ligeramente inferiores a la dispersión del RDP y ciertamente inferiores al ensayo de flexotracción a cuatro puntos.

El ensayo de panel redondo pequeño (Figura 2.4) se ha propuesto como una simplificación del ensayo de panel (RDP) debido a que las grandes dimensiones y el peso de los paneles referente al ensayo RDP (91 kg) dificultan el manejo y la colocación de las muestras. Las muestras SRDP presentan un diámetro de 600 mm y una profundidad de 60 mm, lo que reduce el peso del panel a 40 kg (Conforti, Plizzari, & Tiberti, 2017).

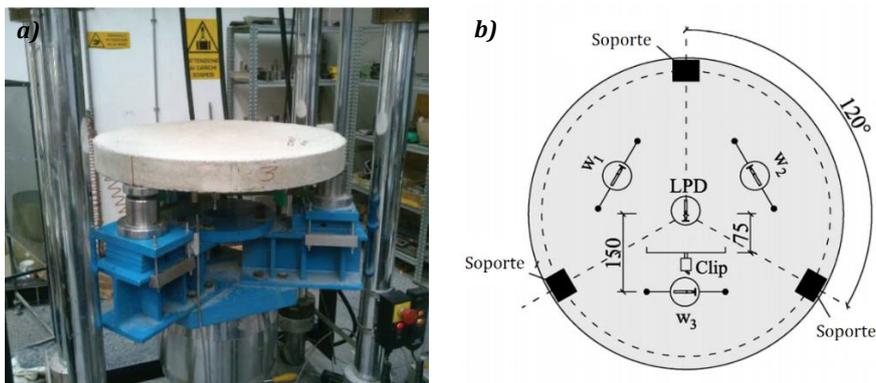


Figura 2.4 – Panel redondo pequeño antes de ser ensayado

a). Geometría de la muestra y configuración del ensayo SRDP b). (Conforti *et al.*, 2017)

En cuanto a la configuración del ensayo (Figura 2.4b) los soportes y la posición del pistón de carga son adaptados de acuerdo con la normativa (ASTM C-1550, 2012). El panel

se carga centralmente, y se esperan tres grietas radiales (w_1 , w_2 y w_3) donde se miden mediante LVDT.

d) DEWS (*Double Edge Wedge Splitting*)

El ensayo DEWS es conocido como un ensayo de tracción indirecta, el cual se efectúa aplicando una carga a compresión el cual induce una fractura por tensión. El ensayo se realiza en probetas cúbicas delgadas y entalladas, se introduce una cuña triangular de inclinación de 45° , en la parte superior e inferior de la muestra (Figura 2.5a). Tres LVDT se han de colocar en ambos lados de la muestra para medir la abertura de fisuras (Figura 2.5b).

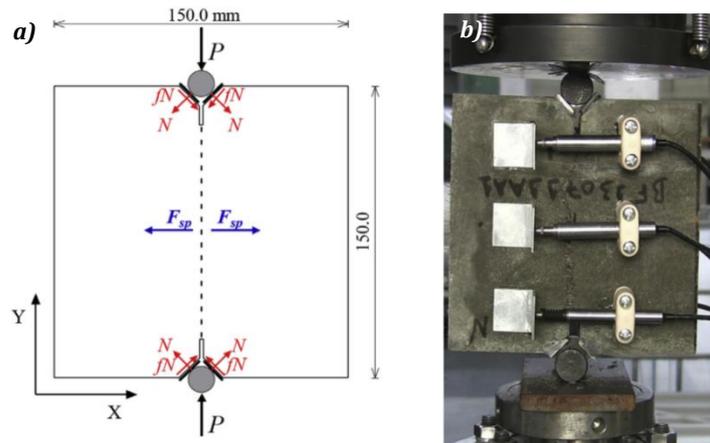


Figura 2.5 – Fuerza de tracción transversal F_{sp}
a). Configuración del ensayo DEWS b). (Nunes *et al.*, 2017)

El ensayo DEWS nace a partir del ensayo *wedge splitting test* (WTS) (Tschegg & Linsbauer, 1986) y de las modificaciones de (di Prisco *et al.*, 2010; Liberato Ferrara *et al.*, 2011), a partir del ensayo *SRDP* con la incorporación de la cuña con entalla.

Esta modificación logra reducir la dispersión en los resultados, pero su alta complejidad y coste agregado, dificulta su uso para el control sistemático del HRF.

e) Ensayo Montevideo (MVD)

El ensayo Montevideo MVD es capaz de determinar el comportamiento residual de las muestras de HRF. El ensayo se basa en el ensayo WST de una manera simplificada, incorporando una entalla en el centro de la muestra. El ensayo de Montevideo (Figura 2.6) se realiza sobre probetas cúbicas o cilíndricas de 150 mm.

Las probetas contienen una entalla de 25 mm de profundidad y 5 mm de ancho en una de sus caras. Se introduce una cuña de inclinación de 28° . Una vez finalizado el ensayo, el patrón de fisuras es similar al exhibido por los ensayos de flexión DEWS y finalmente, las medidas de las fisuras se pueden mediar utilizando un transductor de desplazamiento.

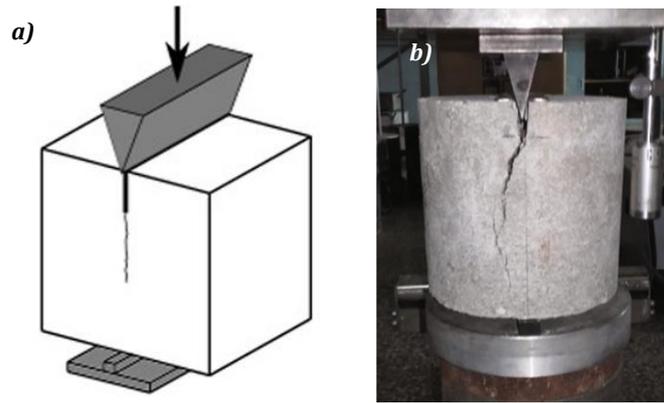


Figura 2.6 – Configuración del ensayo Montevideo en probeta cúbica
a). Probeta cilíndrica tras ser ensayada MVD b). (Segura-Castillo *et al.*, 2018)

2.4.2. Mecanismos de la fluencia en el HRF

El ensayo a fluencia permite estudiar el comportamiento postfisuración de las macrofibras y determinar la resistencia residual del hormigón reforzado con fibras. Debido a que la fluencia es una característica importante del material polimérico como el polipropileno, puede tener un efecto sobre las muestras. Por lo tanto, es interesante estudiar la fluencia de la fibra. De manera general, se conoce que el hormigón se deforma considerablemente bajo carga constante y condiciones normales de servicio. De manera particular, algunos estudios informan que las fibras dentro del hormigón crean un pequeño impacto en el comportamiento de la fluencia en el hormigón. (Babafemi & Boshoff, 2015).

Por otra parte, (Buil & Acker, 1985) demuestran que la introducción de fibras produce un aumento de la deformación por fluencia del hormigón, donde la introducción de fibras de polipropileno o acero causa un aumento pronunciado hasta el 40% de la fluencia del hormigón sin fibras, donde también se ha sustituido hasta el 25% del cemento por humo de sílice. Los resultados demuestran que el hormigón reforzado con macrofibras sintéticas de alto módulo presenta un comportamiento de fluencia similar al del hormigón reforzado con fibras metálicas.

También se ha demostrado que, entre los diferentes parámetros como el contenido de fibra, la longitud de la fibra, la forma de la fibra y la relación de aspecto tiene el mayor efecto sobre el comportamiento de fluencia del HRF (Afroughsabet *et al.*, 2016).

2.4.3. Determinación experimental de la orientación y contenido de fibras

El hormigón reforzado con fibras (HRF) ha demostrado ser un material competitivo en diferentes tipos de elementos estructurales (di Prisco & Plizzari, 2009; Walraven, 2009). En algunos elementos, las fibras se emplean con fines estructurales sustituyendo parcial o totalmente el refuerzo convencional (Blanco *et al.*, 2016; de la Fuente *et al.*, 2011; Klein *et al.*, 2011; Pujadas *et al.*, 2013; Vandewalle, 2000).

Su creciente uso ha generado la necesidad de realizar ensayos que proporcionen información sobre sus propiedades. Además de los ensayos tradicionales expuestos en el inciso anterior (di Prisco *et al.*, 2013; IBN. NBN B 15-238, 1992; Pujadas *et al.*, 2014; RILEM

TC 162-TDF, 2003; UNE-EN 14651:2007), en los últimos años se ha llevado a cabo una importante investigación con el objetivo de desarrollar técnicas capaces de identificar el contenido y la orientación de la fibra en el HRF.

La Tabla 2.3 muestra un resumen de los principales métodos actuales disponibles para la evaluación de la orientación de las fibras. Estos métodos son clasificados en términos del tipo de medida (directa o indirecta) el efecto de la muestra (destrutivo o no destructivo) y el tipo de fibras a las que es aplicable.

Tabla 2.3 – Métodos para la determinación de la orientación y contenido de fibras

Método	Medidas	Técnica	Tipo de fibra		Referencias
			Metálica	No metálica	
Destructivo	Indirecta	Conteo manual	x		(Carmona <i>et al.</i> , 2016; Dupont D, 2005; Ferrara & Meda, 2007; Soroushian P, 1990)
		Ensayo Mecánico	x	x	(Abrishambaf <i>et al.</i> , 2013; Barragán 2002; Kooiman AG, 2000; Pujadas, <i>et al.</i> , 2014)
	Directa	Análisis de imagen	x	x	(Abrishambaf <i>et al.</i> , 2013; Kang & Kim 2011; Meng, W. & Khayat, 2017; Nunes <i>et al.</i> , 2017; Zhang <i>et al.</i> , 2018)
		Método de rayos X	x	x	(Lataste <i>et al.</i> , 2009; Lim <i>et al.</i> , 2018; Robins <i>et al.</i> , 2003; Vandewalle L, <i>et al.</i> , 2008)
		Tomografía computarizada	x	x	(Balázs <i>et al.</i> , 2017; Ponikiewski <i>et al.</i> , 2015; Pujadas <i>et al.</i> , 2014; Švec <i>et al.</i> , 2014; Zhou, B. & Uchida, 2017)
No destructivo	Directa	Espectroscopía de impedancia de corriente alterna (AC-IS)	x		(Ozyurt <i>et al.</i> , 2006; Woo 2005)
		Método Magnético	x		(Ferrara <i>et al.</i> , 2012; Nunes <i>et al.</i> , 2016; Nunes <i>et al.</i> , 2017)
		Línea de transmisión coaxial abierta	x		(JM Torrents <i>et al.</i> , 2009)
		Antenas de guía de ondas dieléctricas	x		(Roqueta <i>et al.</i> , 2011)
		Método de resistividad eléctrica	x		(Barnett <i>et al.</i> , 2010; Lataste <i>et al.</i> , 2008)
		Método Inductivo	x		(Cavalaro <i>et al.</i> , 2016; Cavalaro <i>et al.</i> , 2015; JM Torrents <i>et al.</i> , 2012)

Un ejemplo de método destructivo es el recuento manual, que mediante una expresión teórica (Krenchel H, 1975) relaciona indirectamente el número de fibras de una sección transversal con la orientación promedio de las fibras. Dicho método consiste en triturar las muestras mediante una máquina de compresión y un molinillo, con la intención de extraer las fibras con un imán.

Por otra parte, el ensayo multidireccional (Figura 2.7a) o MDPT (Pujadas *et al.*, 2014) presenta una alternativa eficiente a otros ensayos de caracterización postfisura (di Prisco, *et al.*, 2013; IBN. NBN B 15-238, 1992; Pujadas *et al.*, 2014; RILEM TC 162-TDF, 2003; UNE-EN 14651:2007) con la ventaja de poder cuantificar la contribución estructural tridimensional de la fibra. El ensayo proporciona una aproximación del porcentaje de fibras

alineadas a lo largo del eje principal. Esta información puede ser útil para mejorar el diseño estructural y el control de calidad (con la posibilidad de ser combinada con ensayos no destructivos). Sin embargo, a pesar de los avances en este campo, no existe ningún ensayo no destructivo para el control sistemático del contenido y la orientación de las fibras macro sintéticas estructurales. Por lo tanto, un reto importante es obtener el contenido y la orientación de la fibra macro sintética, utilizando una técnica fiable, sencilla y económica que sea útil independientemente del tipo de hormigón.

En cuanto a los métodos destructivos por medida directa se pueden determinar a partir de diversas técnicas: el análisis de imágenes (Figura 2.7b), el método de rayos X (Figura 2.7c) o la tomografía computarizada imágenes (Figura 2.7d). Sin embargo, debido a su complejidad, su consumo del tiempo y su coste, se han limitado a fines de investigación.

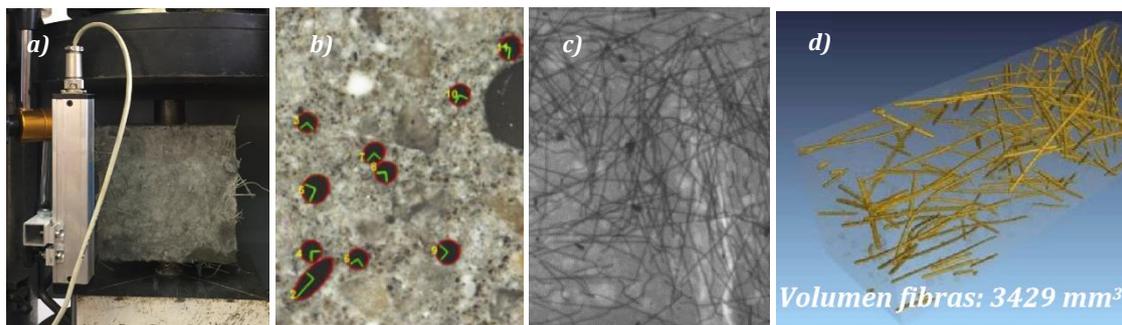


Figura 2.7 – Mét. destructivos: Ensayo mecánico a). Análisis de imagen (Nunes, 2017) b). Método de rayo X (Robins *et al.*, 2003) c). Tomografía computarizada (Pujadas, 2013a) d).

En cuanto al método no destructivo, varias técnicas se han empezado a implementar a partir del campo eléctrico (Tabla 2.3). Respecto a la impedancia eléctrica relaciona el voltaje aplicado y la corriente que fluye a través de un material. Depende tanto de la facilidad intrínseca que fluye de la corriente (conductividad o su resistividad) como de las dimensiones físicas del material y la posición de los puntos de contacto. La corriente electrónica o iónica también define una impedancia electrónica o iónica (Wen & Chung, 2006). Para un material heterogéneo, la impedancia eléctrica depende de la combinación ponderada de impedancias de los componentes del material. La geometría relativa de los componentes define la ponderación de la impedancia eléctrica macroscópica (AK., 1992; Giraud G *et al.*, 1984).

La determinación del contenido y orientación de las fibras sintéticas en el HRF resulta muy atractivo, debido al contraste entre la alta impedancia eléctrica de las fibras (son aislantes) y la impedancia relativamente baja de la matriz de hormigón.

Si se trabaja en corriente continua, aparece la electrólisis (Panchawagh HV & Sounart TL, 2009) ya que los portadores de carga se consumen cerca de uno de los contactos eléctricos, en la proximidad del otro contacto eléctrico. Ese esfuerzo adicional de paso de la corriente se traduce en un aumento de la impedancia con el tiempo. Generalmente en materiales como el hormigón, la polaridad alterna del voltaje es aplicado de forma que las acumulaciones de portadores eléctricos no aparezcan en una porción del material y se ausente en la otra porción.

La velocidad para cambiar la alternancia se conoce como la frecuencia de voltaje aplicado y se expresa en unidades de uno por segundo o Hercio. Para las mediciones, esta alternancia generalmente sigue una forma de onda sinusoidal (Phys, Cole, & Cole, 1941) aunque no siempre (Panchawagh HV *et al.*, 2009). Una alternancia baja, también llamada baja frecuencia disminuye, pero no evita por completo la electrólisis. Una frecuencia muy alta complica la electrónica y, sobre todo, el protocolo de medición (Hippel AR, n.d., 1995).

Como la velocidad de las ondas eléctricas (tanto electrónicas como iónicas) es finita, aparecen longitudes de onda. Esa longitud de onda está relacionada con las medidas de los componentes heterogéneos del material. Al igual en un microscopio óptico no es posible visualizar elementos menores que la longitud de onda visible, la impedancia eléctrica también es una función del tamaño de los componentes de una mezcla heterogénea. En general, la impedancia disminuye con la frecuencia ya que la corriente puede "penetrar" en elementos más pequeños (Campbell JE, 1990; Wen S. & Chung, 1989).

Teniendo en cuenta que los factores mencionados con anterioridad, se conoce que la impedancia eléctrica depende de las medidas del material y de los puntos de contacto. Hasta ahora, la incertidumbre en la medición y la ubicación (por ejemplo, debido a los agregados) de los contactos junto al pequeño volumen de fibras ha impedido que se use la impedancia eléctrica para caracterizar las fibras sintéticas en un HRF. Es decir, resulta muy complicado comparar la impedancia absoluta de un HRF con un alto contenido de fibras de otra muestra de poco contenido de fibras, debido a la incertidumbre en la colocación de los contactos en la medida de impedancia eléctrica es mayor que la contribución de las fibras en un pequeño volumen.

Para poder medir el contenido de fibra, debe medirse relativamente aprovechando la diferencia de relajaciones entre materiales con diferentes contenidos de fibras. Por lo tanto, debe medirse a diferentes frecuencias que no sean demasiado bajas para evitar fenómenos de electrólisis o demasiado altas para no complicar demasiado el protocolo de medición (y su posible aplicación in situ).

Como último problema a evitar (Gersing, 1991), los instrumentos de medida que trabajan con corrientes electrónicas mientras están dentro de las corrientes del HRF también pueden ser iónicos. Así, en el punto de contacto aparece un voltaje extra que puede ocultar la impedancia real. Por lo tanto, puede ser conveniente trabajar con impedancias de cuatro hilos para evitar contribuir a la impedancia de los puntos de contacto.

2.4.4. Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson del hormigón es uno de los parámetros fundamentales y necesarios de conocer, cuando se realizan análisis de estructuras de edificación y de obra civil, fundamentalmente cuando el diseño se basa en consideraciones elásticas para la determinación de la distribución de las deformaciones y los desplazamientos (Sideris, Manita, & Sideris, 2004). De acuerdo al (Euro-código 2, ACI 318, AENOR, 2010) contienen de forma implícita en su articulado el dimensionamiento en estados límites últimos y la comprobación posterior de los estados límites de servicio. Según la normativa ASTM C 318-92 define el coeficiente de Poisson como la relación entre la deformación transversal y axial del hormigón.

En cuanto a la evaluación y optimización del coeficiente de Poisson de fibras plásticas es una de las líneas más prometedoras. Aunque muchos autores reconocen la importancia de este parámetro desde un punto de vista numérico, se ha encontrado información muy limitada sobre la evaluación experimental de esta propiedad y el estudio de su influencia en el comportamiento mecánico de los compuestos cementosos. (Tscharnuter, Jerabek, Major, & Lang, 2011)

Como el proceso de producción puede afectar al patrón microestructural del polímero, la medición de la relación de Poisson debe realizarse directamente sobre la fibra. Sin embargo, la pequeña sección transversal de la fibra compromete la evaluación experimental de dicha propiedad. Esta es una de las barreras responsables de la falta de estudios sobre este tema, lo que limita el potencial de mejora de las fibras.

2.5. DURABILIDAD

Según la investigación de (dal Lago *et al.*, 2017) con el fin de aumentar la durabilidad en ambientes agresivos de elementos estructurales, es posible utilizar el hormigón sin armaduras de acero. al sustituir el acero por materiales compuestos de fibra de alta resistencia, la huella de carbono es limitada. La tecnología de los materiales compuestos ha permitido que la producción de HRF presente mejores prestaciones a la resistencia al impacto, tenacidad, sostenibilidad, superioridad ambiental, facilidad de producción, así como tolerancia a resistencia química, térmica, alta resistencia a la corrosión y al desgaste en comparación con el refuerzo metaliza convencional (Ismail *et al.*, 2016).

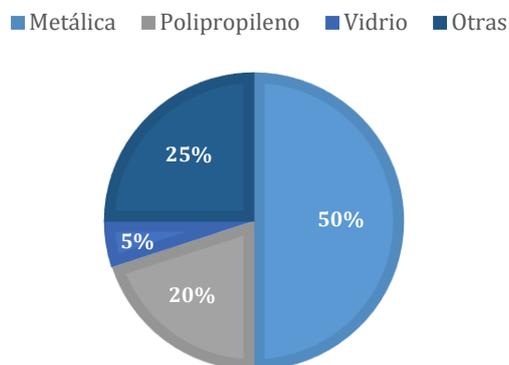


Figura 2.8 – Empleo de fibras

De acuerdo con la investigación de Bantia N. (1994) menciona que el empleo de las fibras de acero es la más utilizada de todas (50%), seguida por las fibras de polipropileno (20%), las fibras de vidrio (5%) y finalmente otras fibras (25%). A diferencia de las fibras metálicas, las fibras sintéticas son químicamente inertes, ligeras y más económicas (Pujadas, 2013). Sin embargo, contiene un menor módulo de elasticidad y una baja adhesión entre la fibra la matriz. Debido a estas características en sus propiedades, surge en el mercado un nuevo tipo de fibras poliméricas, proveniente de una mezcla de polipropileno y polietileno con un mayor módulo de elasticidad.

2.5.1. Durabilidad del hormigón reforzados con fibras no metálicas (HRFnM)

La aparición de fibras no metálicas de alto módulo elástico en el mercado constituye un destacado reto dentro del ámbito del HRF. Algunas fibras no metálicas ofrecen actualmente grandes prestaciones y, además de ser económicas respecto a otras fibras, son en general químicamente inertes y muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, lo que las convierte no solamente en una posible solución estructural, sino que pueden permitir una reducción de costes y recursos asociados a la construcción con destacadas mejoras en cuanto a la durabilidad (aumentando la vida útil de la estructura).

Según el estudio realizado por Garcia *et al.* (2004), el empleo de fibras poliméricas de alto modulo en el hormigón proyectado, proporciona una alta capacidad de carga al material después del agrietamiento, obteniendo resultados similares a los del hormigón proyectado con fibras metálicas.

El empleo del HRF derivadas de la poliolefina, demuestran que estos tipos de fibras son capaces de reducir las fisuras o agrietamiento del hormigón por contracción plástica, proporcionan un refuerzo multidireccional, evitan el deterioro del hormigón, aumentan la tenacidad y la durabilidad del hormigón, contribuyendo a mejorar la impermeabilidad, evitan la segregación del hormigón, sin la necesidad de la colocación de las mallas de refuerzos adicionales, o fibras de acero (Hernández Murcia, 2017).

Otras investigaciones han demostrado que las fibras de polipropileno en el hormigón, puede ser un método eficaz para prevenir el riesgo de desprendimiento “efecto spalling” (Lo, Felicetti, Meda, & Bortolussi, 2019). Según el mecanismo a altas temperaturas, las fibras fundidas crean poros adicionales y pequeños canales, por consiguiente, la humedad y el vapor debe liberarse de una manera más sencilla, y por consecuencia, la presión de los poros debería disminuir en comparación al HRFM (Liu *et al.*, 2008).

2.5.2. Métodos acelerados para la evaluación de la Durabilidad

La determinación de la durabilidad en el material, puede ser diferenciada por la fibra individual, la fibra embebida en hormigón y en probetas de HRF. A partir del ensayo de fibras individuales se evalúa la pérdida de propiedades mecánicas en función del tiempo de inmersión en las diferentes temperaturas. El ensayo de fibras embebidas en hormigón, permite evaluar la pérdida de adherencia fibra-matriz cementicia. Por último, el ensayo de probetas de HRF evalúa la variación en el comportamiento residual.

La ejecución de los ensayos de caracterización de la fibra (hilo madre) es el primer paso para llegar a definir la evaluación de la durabilidad del material. Es de mucha importancia la determinación de las propiedades físicas como mecánicas las que determinan la características y durabilidad del material. Los principales ensayos de caracterización empleados son:

Pull-out

Los ensayos de tracción uniaxial también conocido como ensayo de arrancamiento son los que de manera más fidedigna recogen el comportamiento uniaxial del material. Es importante conocer el comportamiento a Pull-out de las fibras, ya que, en la fase posterior

a la rotura, el comportamiento de las fibras se rige por su respuesta a la tracción en la unión de la matriz (Naaman *et al.*, 1991).

Este ensayo permite analizar los mecanismos de transferencia de tensiones elástico y por la fricción que presenta la fibra cuando es arrancada de la matriz. Diferentes modalidades existen para realizar el ensayo pull-out en fibras. El más empleado es el de arrancamiento de fibra única (Figura 2.9a), donde es insertada en una muestra de hormigón (Banholzer, 2006; Bentur A. *et al.*, 1985). Otra configuración de ensayo, es el modelo que se asemeja al ensayo de tracción axil (Figura 2.9b), el cual consiste en la tracción de dos partes iguales del hormigón mediante una única fibra o múltiples embebidas en la zona de contacto entre ambas partes (Chan & Chu, 2004; Won *et al.*, 2013)

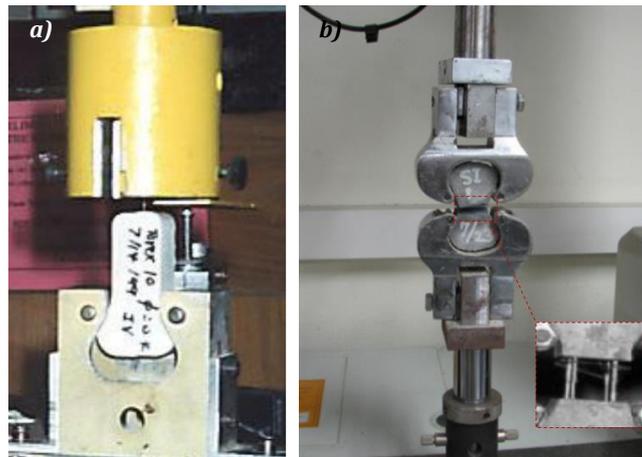


Figura 2.9 – Fibra única insertada en una muestra de hormigón (Naaman, 2012)
a). Fibra embebida en una muestra de hormigón (Won *et al.*, 2013) b).

Microscopía Electrónica de Barrido

En muchos campos de la química, ciencia de materiales, geología y biología, está siendo cada vez más importante el conocimiento detallado de la naturaleza física y de la naturaleza química de las superficies de los sólidos a escala submicrométrica (D. A. Skoog y James J. Leary, 1991). Normalmente, este conocimiento se obtiene básicamente con dos técnicas, la microscopía de barrido de electrones (SEM) y el microanálisis con sonda de electrones (EMPA). Los microscopios electrónicos comerciales más modernos están diseñados para llevar a cabo ambos tipos de mediciones.

Esta técnica microscópica lleva asociada la espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDX) que a su vez permite conocer la configuración atómica de las muestras. Para obtener una imagen por microscopía electrónica, la superficie de una muestra sólida es barrida según un modelo raster con un haz de electrones muy fino. (P. Aranda, 2014).

El microscopio electrónico de barrido es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación.

Espectroscopia Raman

La espectrometría Raman es una técnica espectroscópica utilizada en física de la materia condensada y también en química para el estudio de los modos vibraciones, rotacionales y otros de baja frecuencia en un sistema. Se basa en la dispersión inelástica, o dispersión Raman, de la luz monocromática, que por lo general procede de un láser en el rango visible, infrarrojo cercano, o ultravioleta cercano.

La luz láser interactúa con fonones u otras excitaciones en el sistema, por lo que la energía de los fotones láser se desplaza hacia arriba o hacia abajo. Normalmente, la muestra se ilumina con un rayo láser. La luz del punto iluminado se recoge con una lente y se envía a través de un monocromador. Las longitudes de onda cercanas a la línea láser, debidas a la dispersión elástica de Rayleigh, son filtradas, mientras que el resto de la luz recogida se dispersa en un detector.

La dispersión Raman espontánea es generalmente muy débil y, como resultado, la principal dificultad de la espectrometría Raman es separar la luz débil dispersada inelásticamente de la luz intensa láser por dispersión de Rayleigh. Históricamente, los espectrómetros Raman utilizaban rejillas de difracción holográfica y múltiples etapas de dispersión para lograr un alto grado de rechazo láser.

En el pasado, los detectores de elección para las configuraciones de dispersión Raman eran los fotomultiplicadores, lo que daba lugar a largos tiempos de adquisición. Sin embargo, la instrumentación moderna en casi todo el mundo emplea filtros de muesca o borde para rechazar el láser, así como espectrógrafos y detectores CCD. Hay diferentes tipos avanzados de espectrometría Raman, como la de superficie potenciada, la polarizada, la estimulada, la de transmisión, la compensada espacialmente y la híper-Raman. (Guillermo Pérez, n.d.)

Además de los métodos de ensayos para la evaluación de la Durabilidad presentado existen otros métodos para probetas de HRF:

Ensayo de permeabilidad al gas

El ensayo consiste en inyectar oxígeno seco desde el fondo a través de las muestras cilindras confinadas lateralmente. De acuerdo con (Liu *et al.*, 2008) Se emplea un confinamiento lateral de 7 bar. Los caudales de gas se midieron con flujómetros de burbuja. La permeabilidad efectiva del gas (k_g^{eff} , m^2) se ha calculado con la ley de Darcy modificada por la relación Hagen-Poiseuille cuando se supone que el flujo de gas es laminar y unidireccional.

$$k_g^{eff} = \frac{2\mu_g L P_2 Q}{A (P_1^2 - P_2^2)} \quad [2-2]$$

Donde Q es el caudal de gas medido a la presión P_2 (m^3/s); L y A corresponden a la altura de la probeta (m) y la sección transversal (m^2) respectivamente, μ_g es la viscosidad

dinámica del gas (kg/(m-s); P_1 es la presión absoluta de entrada y el P_2 es la presión de salida en (Pa).

Porosimetría por inyección de mercurio

Se conoce como porosimetría por inyección de mercurio a la técnica indirecta para la caracterización de un sistema poroso en los materiales, obteniéndose fundamentalmente de la distribución de la porosidad en función del tamaño aparente de acceso a los poros. En 1842 ya se menciona la posibilidad de forzar mercurio en madera para obtener su estructura porosa. En 1921 Washburn sugiere obtener la distribución del tamaño de los poros, a partir de los datos presión-volumen obtenidos por intrusión de mercurio. Hacia 1940 se empieza a aplicar dicha técnica, y en 1945 Ritter y Drake son los primeros en publicar gran número de datos experimentales, incluyendo la descripción del equipo y el modo de operación. En la actualidad, con el desarrollo comercial de equipos el ensayo cada vez más utilizado (Van Brakel J *et al.*, 1981). Cuando los poros se consideran de forma cilíndricos, el radio del mercurio es igual al radio de un poro. La relación entre la presión P y el radio de poro r se puede describir mediante la ecuación de Washburn:

$$P = \frac{2 \sigma X \cos \theta}{r} \quad [2-3]$$

Donde el σ es la tensión superficial del mercurio, θ es el ángulo de contacto del mercurio con el material ensayado. El estudio de (Liu *et al.*, 2008) la tensión superficial del mercurio es de 480×10^{-3} N/m y el ángulo de contacto es de 140° .

Ensayo de expansión en autoclave

El ensayo de expansión en autoclave, bajo las condiciones normalizadas en ASTM C-151-69 para el cemento portland, pretende determinar en forma acelerada la expansión que experimentará el cemento y, por lo tanto, el mortero u hormigón en el que se utilice, cuando se halla sometido durante largo tiempo a condiciones de humedad permanente o variable. La presión en autoclave debe ser de $2 \pm 0,7$ MPa a unos 60 minutos después del calentamiento y se debe durante 3 horas antes de enfriarse.

2.6. APLICACIÓN EN ESCALA REAL

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es una alternativa adecuada al hormigón armado tradicional utilizado en la fabricación de dovelas prefabricadas para el revestimiento de túneles excavados con tuneladora (túneles TBM), ya que conduce a mejoras del comportamiento resistente de la matriz cuando está sometido a tensiones de tracción.

Uno de los campos en los que el uso de la fibra estructural está sustituyendo la armadura tradicional son las dovelas en túneles de hormigón prefabricado. Se han realizado diversas aplicaciones de HRF en túneles y pozos en diferentes países del mundo (de la

Fuente, A. *et al.*, 2014). Hoy en día es utilizado para losas de hormigón, prefabricados de hormigón, puentes tanques, canales, paredes, fosas sépticas, pavimentos, entre otros. Precisamente en los elementos tipo dovelas, el empleo de fibras presenta un especial interés. Entre sus múltiples beneficios cabe destacar:

- Las fibras contribuyen a reducir los costes y problemas asociados de la manipulación de ferralla (traslado, doblado, soldaduras, colocación de separadores), ahorrando tiempo y reduciendo los accidentes laborales derivados de este tipo de montajes.
- La contribución de las fibras estructurales, en cuantía suficiente, permite su consideración en el cálculo estructural del elemento.
- Las fibras, al añadirse al hormigón, se dispersan confiriendo a dicha matriz un armado en tres dimensiones. Ello repercute en un incremento de la tenacidad y, por ende, un mejor control de la fisuración pues, contrariamente a lo que sucede con un armado convencional, éstas trabajan en todo el bloque traccionado.
- Durante el proceso de fabricación de las dovelas, dado el modo de hormigonado y el tipo de elemento estructural, resulta una orientación de las fibras favorable a los esfuerzos a los que se verá solicitada la dovela.

Además, para el caso particular del elemento dovela se conocen las ventajas del uso de la fibra frente a las tensiones concentradas que pueden ocurrir durante las fases transitorias como el desmolde, acopio, manipulación, transporte y colocación (Figura 2.10) (de la Fuente *et al.*, 2014).

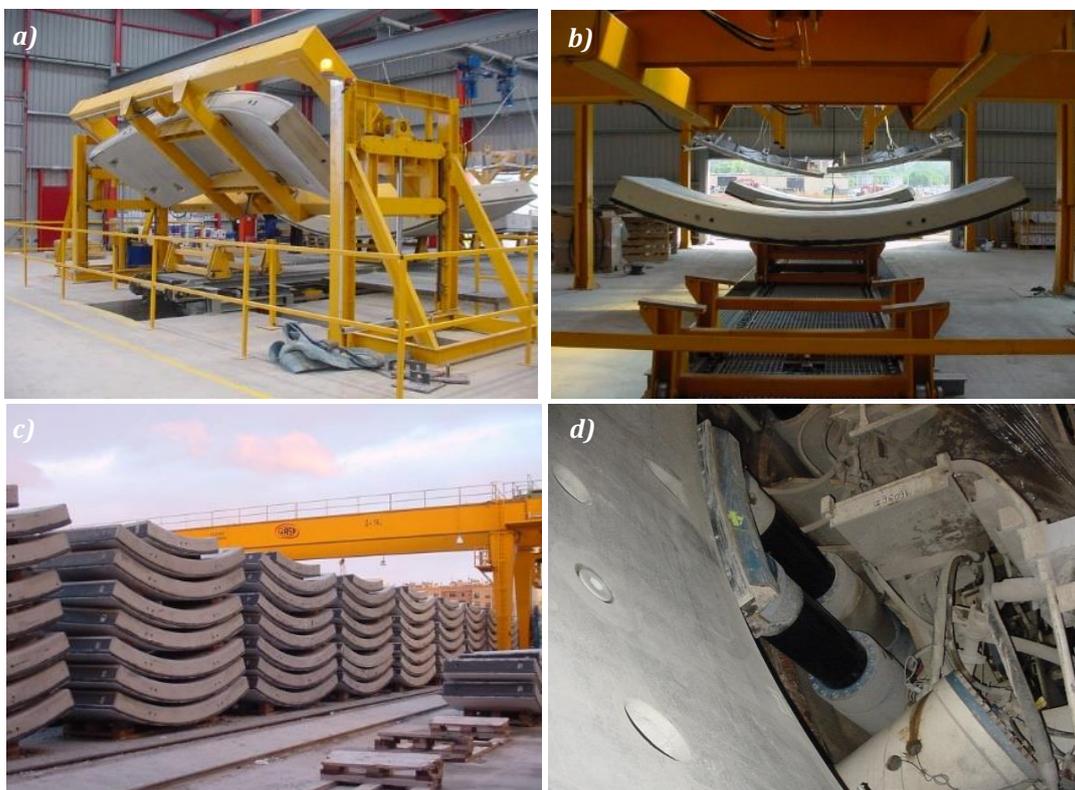


Figura 2.10 – Fases transitorias de carga de las dovelas: desmolde a). transporte b). almacenamiento c). empuje de los gatos d).

En los últimos años a nivel mundial, se ha extendido el empleo de hormigones reforzados con la sustitución parcial o total de las armaduras convencionales por fibras de acero estructural. Sin embargo, los estudios sobre el concepto de dovelas de túnel prefabricado sostenible, reforzado únicamente con fibras estructurales macro sintéticas, son por el momento muy minoritarios, en algunos casos apenas existentes, debido a la falta de experiencia con este tipo de fibras y al desconocimiento de los beneficios que pueden ofrecer a largo plazo.

En la Tabla 2.4 se muestran diversas experiencias mundiales en las que se ha optado, aludiendo a motivos tanto técnicos como económicos, por la sustitución total de la armadura convencional por fibras metálicas en tramos o en la totalidad de la sección del túnel. Funciones como túneles ferroviarios (TF), de metro (TM), de transporte de agua (TA), de transporte de gas, (TG) de transporte de cables (TC) y finalmente de almacenamiento de aguas residuales (CSST), se han empleado para la ejecución de las dovelas.

Tabla 2.4 – Varios ejemplos del uso de fibras metálicas para el refuerzo en dovelas

Nombre	Año	País	Función	Di (m)	h (m)	[λ]	Barras
The Hofoldinginger Stollen	2004	DE	TA	2,9	0,18	16,1	No
Túnel de San Vicente	2006	EE.UU	TA	3,2	0,18	17,8	No
Túnel de Lötschberg	2007	SUI	TF	4,5	0,2	22,5	No
Line 1 del Metro de Valencia	2007	VEN	TM	8,4	0,4	21	Sí
Túnel Beacon Hill	2007	EE.UU	TC	6,7	0,3	22,3	No
Túnel de la desalinizadora Gold C.	2008	AUS	TA	2,8/3,4	0,2	14,0/17,0	No
Túnel de conexión Heathrow - T5	2008	GB	TF	5,7	0,22	25,9	No
Línea 4 del metro de São Paulo	2009	BRA	TM	8,4	0,35	24	No
Túnel Amager - Copenhagen	2009	DEN	TA	4,2	0,3	14	No
Túnel de Fontsa-nta-Trinitat	2010	ES	TA	5,2	0,2	26	Sí
Túnel Clem 7	2010	AUS	TC	11,3	0,4	28,3	No
Túnel Ems-Dollard Crossing	2010	DE-NL	TG	3	0,25	12	No
Túnel Cuty West Cable	2010	AUS	TS	2,5	0,2	12,5	No
Túnel desalinizadora de Adelaide	2010	AUS	TA	2,8	0,2	14	No
Extensión de los FGC en Terrassa	2010	ES	TF	6	0,3	20	Sí
Túnel Brightwater East	2011	EE.UU	TA	5,1	0,26	19,6	No
Túnel Brightwater Central	2011	EE.UU	TA	4,7	0,33	14,2	No
Túnel Brightwater West	2011	EE.UU	TA	3,7	0,26	14,2	No
Túnel East Side CSO	2011	EE.UU	TA	6,7	0,36	18,6	No
Túnel desalinizadora de la Victoria	2011	AUS	TA	4	0,23	17,4	No
Túnel de Monte Lirio	2012	PAN	TA	3,2	0,25	12,8	No
Sydney City East Cable Tunnel	2013	AUS	TC	3,3	0,2	16,5	-
Santos GLNG Gas Transfer Tunnel	2014	AUS	TG	-	-	-	-
Túnel Lee Tunnel Sewer	2015	GB	TA	7,2	0,35	20,6	No
Klang Valley MRT-SBK Line	2016	MY	TM	-	-	-	-
Túnel The Wehrhahn Line	2016	DE	TM	8,3	0,45	18,4	No
Línea 9 de metro de Barcelona	e.c.	ES	MT	10,9	0,35	31,1	Sí
Túnel Brenner Base	e.c.	ITA-AUT	TC	5,6	0,2	28,9	Sí
Crossrail C-305	e.c.	GB	TF	6,2	0,3	20,7	No

*En construcción (e.c.)

En cuanto a la geometría de los anillos evidencian como la esbeltez (λ) varía entre 12 a 36 indicando que los valores bajos de esbeltez representan mayor rigidez del material y a la vez menor sensibilidad a posibles flexiones derivadas de discontinuidades del terreno, y, por tanto, la sección transversal de la dovela tiende a estar comprimida en régimen de servicio. Por el contrario, cuanto mayor es la esbeltez, mayor es la deformidad del anillo y mayor probabilidad de producirse flexiones elevadas concomitantes con el esfuerzo axial de régimen permanente. (de la Fuente *et al.*, 2014).

A pesar de que la tabla presenta las experiencias nacionales e internacionales de túneles con dovelas de hormigón con fibras metálicas, pocos ejemplos reales se han reportado de dovelas reforzadas con fibras plásticas. Se tiene constancia de la ejecución de un túnel hidráulico en Londres perteneciente a la Red Nacional de Conducciones de Gas, de 2,59 m de diámetro y 900 m de longitud ejecutado en 2008, el Utility Tunnel London, donde se utilizaron 7kg/m³ de fibras sintéticas en sustitución total de la armadura convencional.

Por otra parte, en la literatura técnica se reportan estudios de dovelas reforzadas con macrofibras sintéticas tanto como pueden encontrarse referencias del uso de las macrofibras tanto en sustitución de la armadura convencional como sustitución total (Bostr, 2006; Conforti, Tiberti, et al., 2017; Kaundinya, 2005).

En el caso de los estudios previos sobre dovelas reforzadas con macrofibras sintéticas, estudian el comportamiento frente al fuego, debido a la limitante de las fibras metálicas. Es conocido que la temperatura a la que está el hormigón sometido puede condicionar su vida útil, ya que ésta es la causante de diversas patologías relacionadas con la pérdida de durabilidad.

3. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS NO METÁLICAS

3.1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras (HRF) ha demostrado ser un material competitivo en gran cantidad de tipos de estructuras (di Prisco & Plizzari, 2009; Walraven, 2009). Es evidente que la contribución estructural de las fibras en el comportamiento postfisuración del HRF en función de su dosificación (cuantía) en la matriz de hormigón resulta de gran interés.

En cuanto a las fibras no metálicas ofrecen actualmente grandes prestaciones, lo que las convierte no solamente en una posible solución estructural, sino que pueden permitir una reducción de costes y recursos asociados a la construcción. A pesar de las numerosas ventajas que ofrecen estas fibras, aún existen incertidumbres en cuanto a la caracterización y rendimiento de los materiales. La efectividad de la acción reforzante y eficiencia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, donde uno de ellos es el material de la fibra empleada. Con el fin de analizar la viabilidad estructural de las macros fibras no metálicas estructurales, el presente capítulo aborda una amplia campaña experimental sobre la caracterización del HRFnM.

3.1.1. Objetivos

Teniendo esto en cuenta, el presente estudio sobre la caracterización del hormigón reforzado con fibras no metálicas persigue como objetivos:

- Evaluar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del HRFnM, mediante a la variación del tipo de fibra (derivada de la poliolefina, vidrio y basalto), así como las dosificaciones del hormigón (convencional y alta resistencia).
- Analizar el comportamiento físico/mecánico de un conjunto seleccionado de fibras, considerando diferentes cuantías de fibras.
- Analizar y conocer la respuesta estructural de los distintos tipos de hormigones, considerando un diseño de dosificación y contenido de fibra establecido.

3.1.2. Organización del estudio

En el *apartado 3.2* se describe de forma detallada la campaña experimental realizada. La campaña experimental está organizada en tres partes: La 1ª fase se selecciona distintos tipos de fibra, con un contenido de fibra específico y dos dosificaciones de hormigón. La 2ª fase corresponde a un conjunto seleccionado de las mismas fibras de la 1ª fase, con distintos contenidos de fibra. Mientras la 3ª fase corresponde a una optimización de composiciones, considerando un contenido de fibras y hormigón establecido.

Una vez seleccionadas estas fibras, en el *apartado 3.3* se aborda el análisis de los resultados. Los resultados se organizan presentando inicialmente la caracterización del HRF en estado fresco, posteriormente a la determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Finalmente, en el *apartado 3.4* se realiza un criterio de consideración de fibras estructurales mediante la normativa MC-2010, contrastando por los resultados de flexotracción de la campaña experimental.

3.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En este apartado se presentan los detalles principales de la campaña experimental realizada, con la finalidad de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los HRFnM. Se muestran los materiales y dosificaciones utilizadas en la fabricación del hormigón, el tipo y número de probetas fabricadas y se describen los diferentes tipos de ensayos empleado para caracterizar los diferentes hormigones reforzados con fibras fabricados.

3.2.1. Plan de trabajo

Como punto de partida se plantea una campaña experimental con el objetivo de caracterizar diferentes HRFnM, utilizando distintas fibras no metálicas de finalidad estructural. Esta campaña se divide en tres fases presentadas a continuación:

Tabla 3.1 – Descripción de las diversas fases de la campaña experimental.

Campaña Experimental	Fecha	Descripción
Análisis inicial del comportamiento (Fase I)	Junio-Julio 2016 (12 amasadas)	Evaluación del comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del HRFnM, mediante a la variación del tipo de fibra (poliolefina, vidrio y basalto), así como el contenido de fibra y las dosificaciones del hormigón (convencional y alta resistencia).
Selección de fibras (Fase II)	Diciembre 2016- Enero 2017 (8 amasadas)	Evaluación del comportamiento físico/mecánico de un conjunto seleccionado de las mismas fibras de la FASE I, si bien, en esta fase, se considera un mayor contenido de fibra para ahondar en el comportamiento mecánico de las fibras seleccionadas.
Optimización de composiciones (Fase III)	Febrero-Marzo 2017 (8 amasadas)	Evaluación del comportamiento físico/mecánico del HRFnM, mediante a un conjunto de tipo de fibras derivadas de la poliolefina, considerando una dosificación óptima (un diseño de dosificación y contenido de fibra establecido).

La 1ª fase de la campaña experimental se ha desarrollado durante los meses de junio y julio del 2016. Tal y como se indica en la tabla anterior, se evalúa el comportamiento de las propiedades físicas/mecánicas del HRFnM, mediante diferentes tipos de fibras (derivadas de la poliolefina, fibras de vidrio y basalto), con un contenido de fibra específico y dos tipos de dosificación del hormigón (hormigón convencional y de alta resistencia).

El estudio se amplía a partir de una selección de fibras (2ª fase), en donde se abunda el comportamiento físico/mecánico de un conjunto seleccionado de las mismas fibras de la 1ª fase. Finalmente, la 3ª fase considera el estudio de una dosificación óptima a partir de un mismo contenido de fibra.

3.2.2. Dosificaciones y materiales

Con el objetivo de estudiar la influencia de las fibras en la respuesta estructural, durante la 1ª y la 2ª fase de la campaña experimental se evalúan dos tipos de hormigón, correspondientes a un hormigón convencional (HC) y a un hormigón de alta resistencia (AR). De este modo, se abarcan las diferentes casuísticas que se puede encontrar, a nivel de características de la matriz cementicia en la producción de dovelas de hormigón. Finalmente, durante la 3ª fase se evalúa la dosificación óptima correspondiente al hormigón de alta resistencia. A continuación la Tabla 3.2 se muestran las dosificaciones realizadas durante la campaña experimental.

La Tabla 3.2 muestra cinco dosificaciones correspondientes a las tres fases de la campaña experimental. En la 1ª fase para el HC y AR se observa una relación agua/aglomerante de 0,41 y 0,36 respectivamente, mientras que para la 2ª y 3ª fase relaciones a/c de 0,40. La menor relación a/c (1ª Fase AR) se compensa desde el punto de vista de trabajabilidad, con un incremento en la proporción utilizada de los aditivos.

Cabe destacar, que el contenido del aditivo fue ligeramente modificado en obra, con la intención de garantizar una adecuada trabajabilidad del hormigón. Se ha empleado un cemento portland tipo *CEM I* de alta resistencia 52,5 MPa a 28 días y de resistencia inicial elevada R_i , con contenidos de 370 kg/m³ para el HC y 420 kg/m³ para el AR.

Tabla 3.2 – Dosificaciones empleadas en la Campaña experimental.

Componente	FASE I		FASE II		FASE III
	Dosificación [kg/m ³]				
	HC	AR	HC	AR	AR
Arena 0/4	807	732	995	860	860
Árido 4/10	0	128	401	440	440
Árido 10/20	1069	970	499	490	490
Agua	154	154	148	168	168
CEM I/52,5 R	370	420	370	420	420
MasterPozzolith 7003	3,70	4,20	-	-	-
MasterGlenium SKY 886	4,44	5,04	-	-	-
MasterGlenium UG 1323	-	-	3,70	3,15	3,15
Relación arena/grava	0,75	0,67	1,11	0,92	0,92
Relación a/c	0,41	0,36	0,40	0,40	0,40

Con la finalidad de simular la puesta en obra de la producción de dovelas de hormigón, el esqueleto granular más adecuado corresponde a la 3ª fase. Aunque la dosificación empleada de la 1ª fase presenta un formato adecuado para ambas dosificaciones, se ha considerado necesario modificar el esqueleto granular, con la finalidad de alcanzar mejores resultados aumentando así el contenido de finos en ambas dosificaciones. Un mayor detalle a los áridos empleados (curvas granulométricas) se presentan en el *Apéndice A*.

Por otro lado, las fibras empleadas para la fabricación de los hormigones proceden de diferentes orígenes: derivadas de la poliolefina, de fibras de vidrio y de basalto, suministradas por diferentes tipos de empresas, en la cual han sido seleccionadas para el estudio a posterior del HRF. La Tabla 3.3 presenta las propiedades de cada una de ellas.

Los principales parámetros físicos que caracterizan a las fibras plásticas son: su módulo elástico (E), su longitud (l) y su diámetro equivalente (d). El cociente entre estos dos últimos constituye un parámetro conocido como esbeltez o relación de aspecto (l/d); juega un papel importante, manteniendo una relación directa con la mejora de las propiedades del hormigón, específicamente la resistencia postfisuración del material.

Tabla 3.3 – Características de las fibras

Referencia	Propiedades					
	Material ¹	l [mm]	d _{eq} [mm]	l/d	f _t [Mpa]	E [Gpa]
PP1	PO	60	0,92	65	560	20,5
PP2	PO	48	0,77	62	550	n.d.
PP3	PO	53	0,48	115	613	5,4
PP4	POm	48	0,91	53	640	10
PP5	PP	60	0,48	125	640	12
PP6	PO	40	0,75	53	448	3,6
PP7	PO	60	0,79	77	300	2,1
PP8	PP+PE	51	0,66	77	650	9,5
B1	B	70	16	4	n.d.	n.d.
FV1	FV	36	0,54	67	1700	72
FV2	PO+FV	40	1,2	33	600	n.d.

¹ PO: Poliolefina; POm: Poliolefina modificada; PP: Polipropileno; PE: Polietileno; B: Basalto; FV: Fibra de Vidrio.

Para cada tipo de fibra indicado en la Tabla 3.3 y cada dosificación de hormigón, se fabricaron diferentes amasadas. La nomenclatura empleada para la tipificación de los hormigones fabricados y que serán empleados a lo largo de la tesis se presenta a continuación:

$$T_C_f_T_f$$

Donde: T: Indicativo del tipo de hormigón utilizado, que será:

HC, en el caso de hormigón convencional

AR, en el caso de hormigón de alta resistencia

C_f: Contenido de fibra empleado

T_f: Indicativo del tipo de material de fibra empleado. Que será:

PP, fibra derivada de la poliolefina, **B** fibra de basalto y **FV** fibra de vidrio

La Tabla 3.4 recoge los códigos de identificación de las 28 series realizadas correspondientes a cada fase y además, el contenido de fibras en kg/m³ de cada serie empleada. Cada código está formado por la nomenclatura de la dosificación empleada, presentada en el párrafo anterior.

Tabla 3.4 – Nomenclaturas de las dosificaciones y contenido y tipo de fibra específico

	Tipo de hormigón empleado	Tipo de fibra	Contenido de fibra [kg/m ³]	Código
FASE I	Hormigón Convencional (HC)	PP1	6,3	HC_06_PP1
		PP2	6,4	HC_06_PP2
		PP3	6,4	HC_06_PP3
		B1	19,6	HC_20_B1
		FV1	18,8	HC_19_FV1
		FV2	12,6	HC_13_FV2
	Hormigón Alta Resistencia (AR)	PP1	6,3	AR_06_PP1
		PP2	6,4	AR_06_PP2
		PP3	6,4	AR_06_PP3
		B1	19,6	AR_20_B1
		FV1	18,8	AR_19_FV1
		FV2	12,6	AR_13_FV2
FASE II	Hormigón Convencional (HC)	PP1	8	HC_08_PP1
		PP2		HC_08_PP2
		PP3		HC_08_PP3
		FV2	20	HC_20_FV2
	Hormigón Alta Resistencia (AR)	PP1	8	AR_08_PP1
		PP2		AR_08_PP2
		PP3		AR_08_PP3
		FV2	20	AR_20_FV2
FASE III	Hormigón Alta Resistencia (AR)	PP1	10	AR_10_PP1
		PP2		AR_10_PP2
		PP3		AR_10_PP3
		PP4		AR_10_PP4
		PP5		AR_10_PP5
		PP6		AR_10_PP6
		PP7		AR_10_PP7
		PP8		AR_10_PP8

3.2.3. Dosificaciones y materiales

La fabricación de los hormigones de esta campaña experimental tuvo lugar en la planta dosificadora de la empresa PROMSA S.A. situadas en Sant Vicenç dels Horts (Barcelona), bajo cubierta.

Durante la 1ª fase fueron fabricadas durante los días 14, 20, 22 y 28 del mes de junio de 2016. La 2ª fase fue fabricada durante los días 13, 14 y 15 de diciembre del 2016. En cuanto a la 3ª fase fueron fabricadas durante los días 27 y 28 de febrero del 2017. En la primera fase se realizaron las 12 amasadas, mientras que en la 2ª y la 3ª fase se realizaron 8 amasadas por fase, detalladas en la Tabla 3.4.

Con el objetivo de normalizar el proceso de amasado y mantener un criterio en la fabricación del hormigón, se ha establecido un orden en el proceso. A continuación, se muestra el orden de vertido de los componentes a la amasadora de eje vertical de 150 litros, así como los tiempos: 1º) Introducir los áridos en la amasadora y mezclar durante 30

segundos. 2º) Introducir el cemento y mezclar durante 30 segundos más. 3º) Se adicionan las fibras y se mezclan durante 4 minutos. 4º) Sin detener la amasadora se añade el agua de amasado, teniendo en cuenta que se debe dejar 1 litro de agua para mezclarlo con los aditivos. 5º) Introducir el plastificante diluido en agua, se amasaba durante 1 minuto. 6º) Finalmente el superplastificante y amasando por 2 minutos.

Una vez finalizado el amasado del hormigón se vertía el mismo a unos carritos y se transportaban unos metros hasta donde estaban ubicados los moldes correspondientes a los diferentes tipos de ensayo a realizar. En la Figura 3.1 se muestran las diferentes etapas del proceso anteriormente descrito.



Figura 3.1 –Proceso de fabricación del hormigón: Colocación de moldes a). Incorporación de las fibras b). compactación de probeta en mesa vibrante c). Probetas fabricadas d).

3.2.4. Plan de ensayos

A lo largo del presente apartado se describe los diferentes métodos empleados para caracterizar el hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Indicar que, en la Fase I, II y III se han moldeado un total de 168, 104 y 120 probetas respectivamente.

La Tabla 3.5 detalla el plan de ensayos propuesto para las probetas moldeadas durante las campañas antes comentadas. Se muestran las propiedades físicas y mecánicas a estudiar, así como el tipo de probetas y número de ellas en cada determinación por dosificación.

Tabla 3.5 – Plan de ensayos a nivel probeta (Propiedades físicas y mecánicas)

Propiedades		Tipo de Probeta	Dimensiones [mm]	HC	AR
FASE I	Resistencia a flexotracción	Prismática	150x150x600	3	3
	Ensayo Barcelona Velocidad Ultrasónica	Cilíndrica	150x150 ϕ	4	4
	Ensayo a compresión		150x300 ϕ	4	4
	Módulo de Elasticidad Velocidad Ultrasónica		100x200 ϕ	3	3
FASE II	Resistencia a flexotracción	Prismática	150x150x600	3	3
	Ensayo Barcelona	Cilíndrica	150x150 ϕ	4	4
	Ensayo Compresión Módulo de Elasticidad Velocidad Ultrasónica Densidad y Porosidad		150x300 ϕ	6	6
FASE III	Resistencia a flexotracción	Prismática	150x150x600	-	3
	Ensayo Barcelona	Cilíndrica	150x150 ϕ	-	4
	Medida de impedancia eléctrica a cuatro hilos		150x150 ϕ	-	2
	Ensayo Compresión Módulo de Elasticidad Velocidad Ultrasónica Densidad y Porosidad		150x300 ϕ	-	6

Para la caracterización de los hormigones fabricados durante la Fase II y III de la campaña experimental, se siguieron las metodologías de la Fase I. En estas fases se fabricaron más probetas, con la finalidad de realizar ensayos de determinación de la absorción de agua por capilaridad mediante de acuerdo con la norma (UNE-EN 83982:2008) y determinación de la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón, mediante a la normativa (UNE-EN 83980:2014).

a) Propiedades del hormigón en estado fresco

La caracterización del hormigón en estado fresco atiende a los siguientes parámetros o características: densidad, contenido de aire ocluido y trabajabilidad. En la Tabla 3.6 se detallan las normas empleadas en cada uno de los casos; mientras que en la Figura 3.2 se muestran algunos de los ensayos llevados a cabo para caracterizar el comportamiento en estado fresco del HRF: la determinación del aire ocluido (Figura 3.2a) y la trabajabilidad (Figura 3.2b).

Tabla 3.6 – Normativas seguidas para la caracterización en estado fresco HRF

Propiedad	Norma
Densidad	(UNE-EN 12350-6:2009)
Aire ocluido	(UNE-EN 12350-7:2010)
Trabajabilidad	(UNE-EN 12350-2:2009)



Figura 3.2 – Ensayos en estado fresco del HRF: aire ocluido a). trabajabilidad b)

La Figura 3.2b corresponde a la dosificación de alta resistencia de la 1ª fase (AR_06_PP1) presentando un asentamiento de 12 ± 1 y una consistencia fluida.

b) Determinación de las propiedades físicas

Determinación de Velocidad ultrasónica

La determinación de la velocidad ultrasónica permite caracterizar no sólo las características del hormigón, sino apreciar de manera indirecta la posible presencia de poros en el material. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de la realización del ensayo.

Las medidas de velocidad de ultrasonidos se han realizado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC. Son realizadas en modo de transmisión directa empleando un equipo Pundit PL-200, de la casa Proceq. Se emplean transductores Proceq de frecuencia central de 54 KHz, operando a una frecuencia y un voltaje de XX e YY. Para facilitar el acoplamiento, se aplicó una capa de gel en base acuosa entre el transductor y la probeta de hormigón. Las medidas han de ser realizadas siempre por el mismo operador, para reducir posibles dispersiones a la hora de realizar la medida.



Figura 3.3 – Realización de medidas de velocidad ultrasónica en probetas de HRF

La velocidad ultrasónica puede ser empleada como una medida indirecta de la calidad del hormigón. En el mundo de la Ingeniería Civil y la Construcción está muy extendida la clasificación mostrada en la Tabla 3.7 por la cual clasifica la calidad del hormigón entre muy pobre y excelente, en función de la velocidad ultrasónica determinada en medidas de transmisión directa.

Tabla 3.7 – Calidad del hormigón en función de su vel. ultrasónica (Tobio, 1967)

Calidad del Hormigón	Velocidad Ultrasónica (m/s)
Muy pobre	Por debajo de 2000
Pobre	2000-3000
Ligeramente bueno	3000-3500
Bueno	3500-4000
Muy bueno	4000-4500
Excelente	Por encima de 4500

Determinación de la Densidad y Porosidad accesible al agua del hormigón

La determinación de la densidad y porosidad de las diferentes amasadas, se efectúa empleando una probeta cilíndrica de 150 x 300 mm por dosificación. A partir de cada probeta se realiza un plan de corte, el cual permite obtener 4 réplicas cilíndricas de 50x150 mm por dosificación. El ensayo se lleva cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la UPC, según la norma (UNE-EN 83980:2014). Antes de dar inicio al ensayo, las probetas previamente se deben acondicionar según el procedimiento descrito en la norma (UNE-EN 83966:2008).

A partir de la medida del peso seco (m_1), medida del peso tras saturación por vacío (m_3) y peso aparente (m_4), se obtienen las densidades del material (ρ_{seca} y $\rho_{aparente}$) y su porosidad accesible al agua, empleando las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$\text{Densidad en seco, } \rho_{seca} = \frac{m_1}{m_3 - m_1} \cdot \rho_{agua} \quad [3-1]$$

$$\text{Densidad aparente, } \rho_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_4} \cdot \rho_{agua} \quad [3-2]$$

$$\text{Porosidad accesible al agua, \%} = \frac{\rho_{ap} - \rho_{seca}}{\rho_{ap}} \cdot 100 = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_4} \cdot 100 \quad [3-3]$$

Donde: m_1 : es el peso de la muestra en g;
 m_3 es el peso de la muestra tras ebullición/vacío, en g;
 m_4 es el peso aparente, en g;
 ρ_{agua} es la densidad del agua (1g/cm³);
 ρ_{seca} es la densidad en seco de la probeta, en g/cm³;
 ρ_{ap} es la densidad aparente de la probeta, en g/cm³.

c) Determinación de las propiedades mecánicas

Determinación de la resistencia a compresión y módulo elástico

Se ha considerado la caracterización tanto de la resistencia a compresión (a 7 y 28 días), como el módulo elástico del HRF. Si bien la adición de fibras no influye directamente en la resistencia a compresión del hormigón, esta medida puede permitirnos verificar si la incorporación de las fibras afecta al material por la inclusión de aire.

Las medidas de resistencia a compresión son realizadas en el laboratorio de PROMSA, según la norma (UNE-EN 12390-3:2009) Para llevar a cabo este ensayo se han de utilizar probetas cilíndricas de dimensiones 150x300 mm. Las probetas se deben pulir en una pulidora automática previamente a las medidas, para obtener caras plano paralelas.

La determinación del módulo elástico se lleva a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la UPC, según la norma (UNE-EN 12390-13:2014); los ciclos para la determinación del módulo se realización bajo el criterio del método B.

Para llevar a cabo este ensayo en la Fase I se utilizaron probetas cilíndricas de dimensiones 100x200 mm, mientras que en las Fases II y III se utilizaron probetas cilíndricas de dimensiones de 150x300 mm. Los ensayos fueron llevados a cabo en una prensa universal IBERTEST MEH-3000, controlada por ordenador.

En la Figura 3.4 se muestran los transductores inductivos LVDT, empleados para determinar el módulo elástico. Se pueden apreciar los dos anillos separados por una distancia de 15 cm los cuales son fijados a una altura de la probeta tal que la distancia entre cada anillo a la base de la probeta es equidistante a 7,5 cm. Durante los ensayos se aplicó una carga inicial de 0,5 kN/mm², incrementándose a una velocidad de 0,5 kN/mm² hasta alcanzar el valor de un tercio de la resistencia a compresión del hormigón ($\sigma_a = f_c/3$).



Figura 3.4 – Configuración del ensayo de módulo de elasticidad

Ensayo a Flexotracción (UNE-EN 14651:2007)

Por razones prácticas, las normas y códigos de referencia recomiendan el empleo de ensayos a flexotracción sobre probeta prismática, con carga en el centro y entalla o con cargas aplicadas a tercios de los apoyos. En esta campaña experimental se realizó sobre probetas prismáticas de dimensiones 150x150x 600 mm, de acuerdo con la norma (UNE-EN 14651:2007).

La Figura 3.5 muestra la representación esquemática del tipo de probetas y configuración del ensayo, pudiéndose observar que la carga se aplica en el centro del vano. La probeta se apoya sobre rodillos separados a una distancia de 500 mm entre sí.

A las probetas se les realizaron una entallas de 25 mm de profundidad en el centro (ver Figura 3.6a). Con el fin de controlar la aparición de la fisura y su abertura, los ensayos fueron realizados empleando un clip para determinar la apertura de fisura o CMOD (por las siglas en inglés de *Crack Mouth Opening Displacement*). Teniendo en cuenta que el ensayo

finaliza al alcanzar una abertura del CMOD de 4 mm. Como resultado final se obtiene una fisura aparecida desde la entalla (Figura 3.6b).

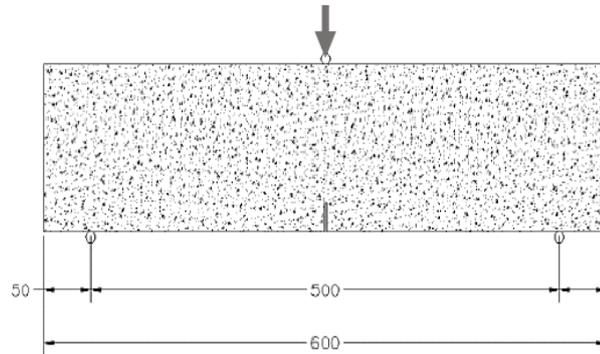


Figura 3.5 – Configuración del ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007)



Figura 3.6 – Entalla de una probeta prismática a), probeta prismática ensayada b).

Ensayo Barcelona

En esta campaña experimental se realiza sobre probetas cilíndricas de dimensiones 150x150 mm, de acuerdo con la norma (UNE-EN 83515:2010), ante la objeción del uso de la cadena extensométrica. El ensayo se modificó de acuerdo con los nuevos desarrollos presentados por (Pujadas, 2013) para determinar el valor de TCO_D a partir del desplazamiento del pistón.

La configuración del ensayo Barcelona empleada se puede apreciar en la Figura 3.7. La probeta se coloca en la prensa de carga con dos punzones de acero de diámetro de 37,5 mm y una altura de 15 mm, (uno en la parte superior y el otro en la inferior), los cuales transmiten la carga a la probeta. El ensayo Barcelona se realiza con control de desplazamiento, aplicando la carga de forma uniforme con una velocidad de descenso del pistón de 0,5 mm/min.

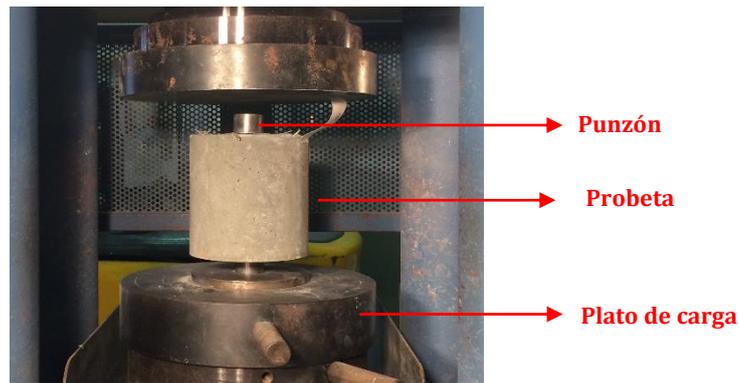


Figura 3.7 – Configuración del ensayo Barcelona

En el ensayo Barcelona (o ensayo de doble punzonamiento) se identifican 3 etapas claramente diferenciadas: 1) fase elástica y lineal; 2) fase de transición; 3) fase o rama residual. La etapa 1 coincide con la aplicación de la carga. Las tensiones generadas son íntegramente resistidas por la matriz de hormigón (aún sin fisurar) y su comportamiento puede considerarse elástico y lineal. En esta etapa el desplazamiento axial medido, se atribuye principalmente al efecto Poisson de la matriz de hormigón (Figura 3.8a).

Cuando las tensiones alcanzan la resistencia a tracción del material, la probeta inicia la etapa 2. En esta etapa se forman (de manera súbita) las fisuras principales y los conos bajo los punzones (Figura 3.8b). Esta etapa marca la transición entre los mecanismos descritos para las etapas 1 y 3 respectivamente. Una vez formadas y estabilizadas las fisuras principales, se inicia la fase o etapa 3; bajo un mecanismo cinemático se produce el deslizamiento entre los conos formados y los bloques de hormigón resultantes tras la fisuración de la probeta, tal y como se ilustra en la Figura 3.8c. Esta etapa corresponde al tramo en el que se desarrolla la resistencia residual del HRF. (Pujadas, 2013a)

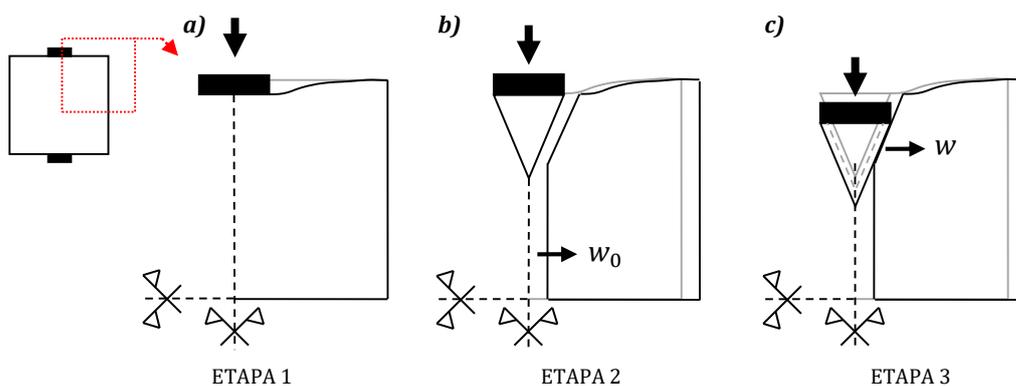


Figura 3.8 – Etapas que suceden durante el ensayo Barcelona (Pujadas, 2013a)

En este apartado, sin embargo, se aborda el estudio, únicamente, de las etapas 2 y 3 dado que son éstas las etapas en las que se aprecia la contribución de las fibras. Por este motivo, y con objeto de facilitar la comprensión de los datos aportados, en adelante, los resultados se muestran tomando como origen del desplazamiento de pistón, el punto de fisuración de la probeta (Figura 3.9). De este modo, podemos comparar resultados en régimen postfisuración obtenidos para HRF diferentes.

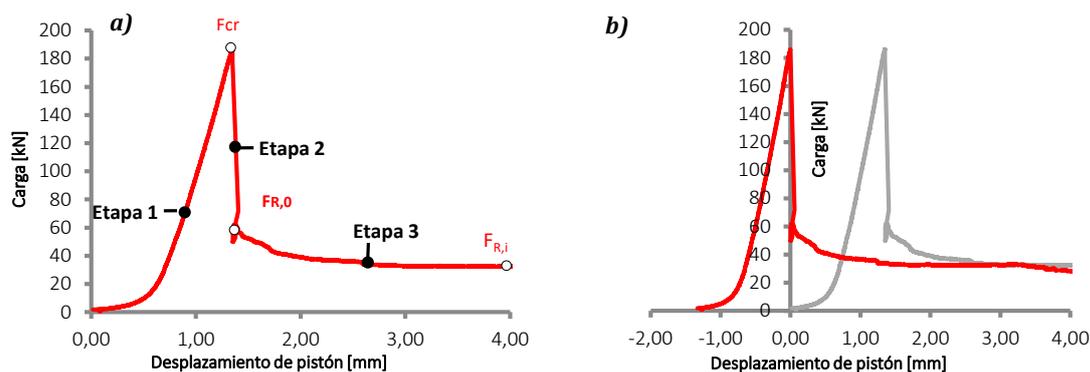


Figura 3.9 – Definición de las etapas ensayo Barcelona a). Desplazamiento de la curva a nuevo origen de referencia b). (adaptada de Pujadas, 2013a)

Una vez el hormigón ha fisurado, las fibras ejercen un efecto “puente” o “cosido” entre los áridos gruesos, permitiendo una formación controlada de las fisuras, y llevando al hormigón a un comportamiento dúctil.

3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: FASE I

3.3.1. Propiedades del hormigón en estado fresco

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados de las propiedades del hormigón en estado fresco (densidad, aire ocluido y trabajabilidad) obtenidos de las probetas moldeadas durante la 1ª fase de la campaña experimental. Las amasadas correspondientes al HC presentaron una consistencia líquida, tras modificar la dosificación de aditivo al apreciar problemas de trabajabilidad y puesta en obra en las primeras amasadas, mientras que los hormigones de alta resistencias presentaron consistencias plásticas – fluidas, semejando así el hormigón prototipo para Dovelas.

Tabla 3.8 – Propiedades del HC y AR en estado fresco

Tipo de hormigón empleado	Código	Densidad [kg/m ³]	Aire Ocluido [%]	Asentamiento [cm]	Consistencia
Hormigón Convencional	HC_06_PP1	2425	1,7	17±1	Líquida
	HC_06_PP2	2375	2,7	16±1	Líquida
	HC_06_PP3	2406	3,3	15±1	Líquida
	HC_20_B1	2716	4,0	-	-
	HC_19_FV1	2450	2,3	-	-
	HC_13_FV2	2713	1,8	-	-
Hormigón Alta Resistencia	AR_06_PP1	2450	2,3	12±1	Fluida
	AR_06_PP2	2420	2,4	5±1	Plástica
	AR_06_PP3	2400	2,5	4±1	Plástica
	AR_20_B1	2410	3,6	5±1	Plástica
	AR_19_FV1	2767	2,4	12±1	Fluida
	AR_13_FV2	2408	1,8	14±1	Fluida

Con respecto a la densidad en estado fresco, se aprecia que las diferentes amasadas de HC se pueden distinguir en dos grupos: hormigones con densidades de aproximadamente 2.400 kg/m³ (PP1, 2, 3 y FV1) y con densidades de 2.700 kg/m³ B1 y FV2. Los hormigones del primer grupo de densidad corresponden a aquellos fabricados con fibras de poliolefina y de fibra de vidrio. En el segundo grupo corresponde a los fabricados

con fibras de basalto y las fibras de vidrio reforzadas con poliolefina, que son los que presentan una mayor densidad. Los hormigones con fibra de poliolefina presentan valores de densidad en estado fresco muy similares entre sí, sin que se pueda apreciar una influencia del tipo de fibra en el material.

La densidad en estado fresco, correspondiente a las fibras de poliolefina de las diferentes amasadas de AR, presentan valores muy similares en el entorno de 2400 kg/m^3 . Las diferencias que se aprecian entre las densidades obtenidas para las amasadas de HC y de AR han de ser las correspondientes a las fibras de vidrio y de basalto.

Al analizar el aire ocluido del HC, sí se aprecian influencias en función de la fibra empleada, tanto del tipo de material como de las características geométricas. Los mayores contenidos de aire ocluido los encontramos con las dosificaciones PP3 y B1. Estos contenidos de aire ocluido ponen de manifiesto que, durante el amasado y puesta en obra, las características geométricas de las fibras conducen a una mayor oclusión de aire. En última instancia, esto puede influir posteriormente en el comportamiento mecánico y durable de los hormigones fabricados con las citadas fibras.

En cuanto a las amasadas correspondientes al AR se aprecia que las diferentes amasadas presentan valores de aire ocluido muy similares, en el entorno del 2,4%. Nuevamente, la amasada con fibras de basalto (AR_07_B1) es la que presenta un mayor contenido de aire ocluido. Este resultado es lógico dadas las características de la fibra de basalto empleada, que se suministraba en forma de hebras formadas por una cantidad elevada de pequeñas fibras de basalto, tal y como muestra la Figura 3.10.



Figura 3.10 – Fibras de Basalto

3.3.2. Velocidad Ultrasónica

En la Figura 3.11 se muestran los resultados de las velocidades ultrasónicas obtenidos de las diferentes amasadas de HC y AR, para dos tamaños de probeta moldeada ($100 \times 200 \text{ mm}$ y $150 \times 150 \text{ mm}$) durante la 1ª fase de la campaña experimental. Las diferencias que se aprecian entre los valores de velocidad ultrasónica de las diferentes probetas pueden obedecer a diferencias en el proceso de compactación de las mismas, si bien las tendencias que se aprecian son similares en ambos casos. Los valores de velocidad ultrasónica obtenidos son en todos los casos superiores a 3500 m/s , lo cual nos permite calificar a los diferentes hormigones obtenidos como de buena calidad, según la clasificación de la Tabla 3.7.

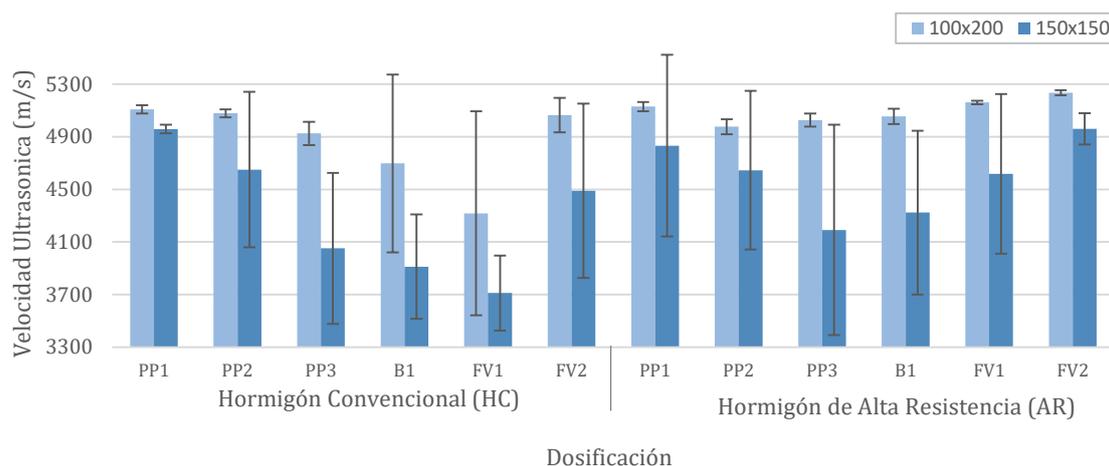


Figura 3.11 – Velocidad ultrasónica de las amasadas de HC y de AR

Con respecto a los resultados en HC de velocidad ultrasónica en probetas de geometría de 150x150, se aprecia que las diferentes amasadas se pueden diferenciar en tres grupos: hormigones con velocidades entre 3500-4000 m/s, pertenecientes al grupo de hormigón de calidad buena (B1 y FV1), con velocidades entre 4000-4500 m/s, pertenecientes a una calidad muy buena en el hormigón (PP3 y FV2) y con velocidades por encima de los 4500 m/s pertenecientes al grupo de excelente calidad de hormigón (PP1 y PP2).

En cuanto al HC, los hormigones con fibras de poliolefina presentan los mejores resultados, pero con diferencias notorias entre sí, donde se puede apreciar una ligera influencia del tipo de la geometría de la fibra, donde los mejores resultados presentan las fibras PP1, aquellas con la mayor longitud. Se aprecian influencias en los resultados en función al material, al igual que en la determinación del estado fresco del hormigón. Tomando los datos de los resultados más desfavorables, en este caso los resultados de las probetas cilíndricas de 150x150. Mientras que el grupo de hormigón de buena calidad (B1 y FV1) presentan el mayor coeficiente de variación.

En referencia a los resultados de AR, las velocidades ultrasónicas obtenidas son ligeramente superiores con respecto al hormigón convencional, correspondiente a un 24,4% para el caso más desfavorable. De manera análoga, se puede apreciar como el tipo de fibra influye de manera clara en la velocidad ultrasónica de las diferentes amasadas, al igual que por la geometría de la muestra. Con respecto a estas probetas correspondientes al AR, se pueden diferenciar en dos grupos: hormigones con velocidades entre 4000-4500 m/s, pertenecientes a una calidad muy buena en el hormigón (PP3 y B1) y con velocidades por encima de los 4500 m/s pertenecientes al grupo de excelente calidad de hormigón (PP1, PP2, FV1 y FV2).

Figura 3.11 muestra que para los resultados de HC en probetas de 100x200 mm, la amasada que mayor velocidad ultrasónica presenta la amasada HC_67_PP1, con un valor promedio de 5109 m/s, en comparación con los AR presenta un 0,41% inferior a la velocidad ultrasónica, siendo una diferencia insignificante entre sus resultados. Al igual en las probetas de 150x150 mm, la dosificación PP1 presentó los mayores resultados en

velocidad ultrasónica, con un valor promedio de 4958 m/s y en comparación con los AR presentan un 2,58% superior.

En el caso de los AR en probetas de 100x200 mm, la dosificación AR_13_FV2 con un valor promedio de 5234 m/s presenta la mayor velocidad ultrasónica, en comparación con los HC presenta un 3,36% superior. Asimismo, en el caso de las probetas de 150x150 la dosificación AR_13_FV2 presenta la mayor velocidad ultrasónica con un valor promedio de 4959 m/s, presentando un 10,47% superior ante el HC.

3.3.3. Resistencia a Compresión

Los resultados obtenidos correspondientes a cada dosificación de la 1ª fase se presentan a continuación. A pesar que la adición de las fibras en el hormigón no influye de forma significativa en la resistencia a compresión, sí que modifica el comportamiento postfisuración, concediendo al material una mayor ductilidad. La Tabla 3.9 muestra los valores medios de la resistencia a compresión (f_{cm}) a 7 y 28 días, junto con los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 3.9 – Caracterización a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días (1ª fase).

Tipo de hormigón empleado	Código	Edad [días]	Promedio [MPa]	Desv. Estándar [MPa]	C.V. [%]	Edad [días]	Promedio [MPa]	Desv. Estándar [MPa]	C.V. [%]
Hormigón Convencional	HC_06_PP1	7	60,1	0,11	6,43	28	68,1	0,01	0,78
	HC_06_PP2		57,9	0,02	1,2		62,9	0,02	1,06
	HC_06_PP3		58,5	0,07	4,31		62,1*	-	-
	HC_20_B1		61,5	0,02	0,99		65	0,03	1,63
	HC_19_FV1		60,4	0,06	3,32		65,9	0,05	3,61
	HC_13_FV2		58,3	0,03	1,84		64,2	0,02	1,41
Hormigón Alta Resistencia	AR_06_PP1	7	51,5	0,11	5,66	28	61,4	0,01	0,42
	AR_06_PP2		63	0,07	4,24		73,1	0	0,14
	AR_06_PP3		59,6	0,05	2,97		68	0,02	1,20
	AR_20_B1		60,8	0,06	3,89		73,3*	-	-
	AR_19_FV1		62,1	0,03	1,77		69,5	0,02	1,13
	AR_13_FV2		51,1	0,04	2,12		73,2	0,01	0,92

* Los resultados marcados con (*) indican que solo se ensayó una muestra, por ende, no estiman resultados en el CV.

En lo que respecta a las amasadas de hormigón convencional, no se aprecian diferencias significativas entre los valores de resistencia a compresión obtenidos a 7 días en función del tipo de fibra. El valor oscila entre los 61,5 MPa de la dosificación HC_20_B1 (con fibras de basalto) y los 57,85 de la dosificación HC_06_PP2 (fibra de poliolefina). Sí se aprecian mayores diferencias en lo que respecta a las amasadas de hormigón de alta resistencia. Así, las dosificaciones AR_06_PP1 y AR_13_FV2 presentan valores de resistencia a compresión de 51,5 y 51,1 MPa, respectivamente, frente a un valor promedio de 61 MPa del resto de amasadas. Estas diferencias pueden ser reflejo de los problemas encontrados con la trabajabilidad de las mezclas.

Para la edad de 28 días, se aprecian divergencias entre las diferentes amasadas, tanto para hormigón convencional como para hormigón de alta resistencia. Estas diferencias ponen de manifiesto la influencia de las fibras en la trabajabilidad del material y, por ende, en su desempeño mecánico posterior.

Este fenómeno se explica por la influencia que tiene la adición de cuantías elevadas de fibras en la porosidad de la matriz. Las fibras, actuando como áridos de bajo coeficiente de forma, pueden favorecer la formación de un volumen mayor de poros en el esqueleto granular (Markovic, 2006).

Con lo que respecta a las amasadas de hormigón convencional, se aprecian tres tendencias de comportamiento, en función del valor de resistencia a compresión. La amasada que presenta la mayor resistencia a compresión corresponde la serie HC_06_PP1, con un valor de 68,05 MPa. En un grupo intermedio corresponde con las series HC_20_B1, HC_19_FV1 y HC_13_FV2, con valores de resistencia a compresión a 28 días en torno a 65 MPa. Finalmente, las amasadas HC_06_PP2 y PP3 son las que presentaban menores valores de resistencia a compresión a 28 días, encontrándose estos en el entorno de los 62 MPa.

Por su parte, los resultados resistentes de HC, ratifican los resultados de velocidades ultrasónicas, en donde la amasada que presenta la mayor resistencia a compresión es la perteneciente al grupo de excelente calidad de hormigón, mientras que el grupo intermedio, son pertenecientes al grupo de hormigón de calidad buena, para finalizar las amasadas pertenecientes a los menores valores resistentes, lo cual una posible explicación a estos valores puede encontrarse en los contenidos de aire ocluido en ambas dosificaciones, ya comentados en el apartado 3.3.1.

Con respecto a las dosificaciones de hormigón de alta resistencia presentan tendencias similares, pudiendo agrupar las diferentes amasadas en 3 grupos en función de la resistencia a compresión.

Las amasadas que mayor resistencia a compresión presentaban eran las amasadas PP2, B1, FV1, con valores de resistencia a compresión a 28 días en torno a 73 MPa. En un grupo intermedio encontramos las amasadas PP3 Y FV2, con valores de resistencia a compresión a 28 días con un promedio de 68,73 MPa. En último lugar, la amasada PP1 presentando el valor menor de resistencia a compresión a 28 días con un valor de 73,30 MPa.

3.3.4. Módulo de elasticidad

La Tabla 3.10 muestra los valores de módulo de elasticidad para las diferentes amasadas, de HC y AR. Puede observarse que, en general, no se aprecian diferencias significativas entre los diferentes valores, oscilando estos entre 43 y 47 GPa.

En lo que respecta a las amasadas de HC, se aprecian tres tendencias de comportamiento, en función del valor promedio de módulo de elasticidad. Según estos resultados, las amasadas que presentan el mayor módulo de deformación corresponden al HC_06_PP1 y HC_13_FV2, con un valor promedio de 45,71 GPa. En un grupo intermedio encontramos las amasadas correspondientes a las fibras PP3, B1 y FV1, con valores de módulo de deformación a 28 días en torno a 44,40 GPa. Finalmente, la amasada PP2 presentando el valor menor de módulo de deformación con un valor de 43,1 GPa. Dicho efecto puede verse causado por la capacidad de confinamiento de las diferentes fibras que incorpora el material, tal y como se ha visto en el ensayo a compresión.

Tabla 3.10 – Caracterización del módulo elástico (E_{cm}) a los 7 y 28 días (1ª fase).

Tipo de hormigón empleado	Código	Promedio [GPa]	Desv. Est. [GPa]	C.V. [%]
Hormigón convencional	HC_06_PP1	46,3	0,84	1,81
	HC_06_PP2	43,1	0,77	1,75
	HC_06_PP3	44,3	0,73	1,65
	HC_20_B1	44,63	1,99	4,46
	HC_19_FV1	44,26	0,11	0,25
	HC_13_FV2	45,12	1,36	3,01
Hormigón alta resistencia	AR_06_PP1	45,48	1,02	2,24
	AR_06_PP2	44,76	0,09	0,19
	AR_06_PP3	44,8	1,72	3,85
	AR_20_B1	42,95	0,63	1,46
	AR_19_FV1	46,93	0,84	1,78
	AR_13_FV2	46,28	0,16	0,35

Por otro lado, en el caso de las amasadas de hormigón de alta resistencia, se aprecian tres tendencias de comportamiento en el módulo de elasticidad, las amasadas que presentan el mayor módulo de deformación eran la FV1 y FV2, con un valor promedio de 46,60 GPa. En un grupo intermedio encontramos las amasadas PP1, PP2 y PP3, con valores de módulo de deformación en torno a 45 GPa. Por último, la amasada B1 presentando el valor menor de módulo de deformación con un valor de 43,1 GPa.

3.3.5. Ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007)

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, para la realización del ensayo a flexión se han utilizado tres probetas prismáticas de 150x150x600mm por cada dosificación.

Con el objetivo de mostrar el comportamiento postfisuración de las distintas dosificaciones, la Figura 3.12 presentan los gráficos de la primera fase en términos de carga residual medias frente al CMOD. Tal y como muestra la Figura 3.12 tanto para el HC como el de AR, presentan un comportamiento similar en la parte elástica, mientras que en el momento de aparición de la fisura en el hormigón, se activa el mecanismo resistente de las fibras y se producen importantes diferencias en la resistencia postfisuración del material.

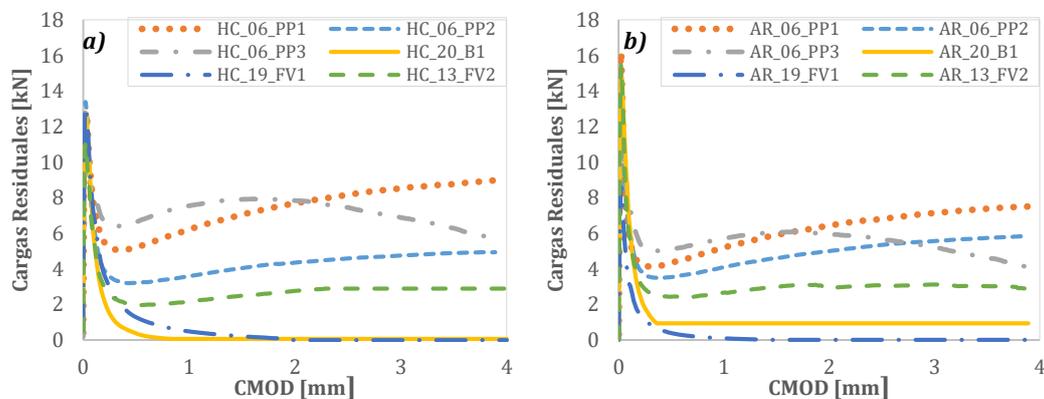


Figura 3.12 – Curva Carga-CMOD: HC 1ª Fase a). AR 1ª Fase b).

A partir de los resultados generales del ensayo, pueden realizarse las primeras observaciones. En la Figura 3.12 se observa que para ambos hormigones (HC y AR) correspondientes a las fibras derivadas a la poliolefina presentan valores resistentes más elevados que con las fibras de vidrio y reforzadas con basalto, siendo la fibra PP1 la que presenta para ambos tipos de hormigones el mejor comportamiento postfisuración.

Las amasadas correspondientes a las fibras PP1, obtienen las mejores resistencias residuales, con la tendencia de recibir las mejores respuestas residuales a mayores aberturas de fisuras (3,5mm). Por otra parte, las amasadas correspondientes a las fibras PP3, presentan las mejores resistencias residuales a menores aberturas de fisura (0,5mm), Este comportamiento residual responde a la geometría y textura de la fibra. Al tratarse de una fibra de gran esbeltez, su resistencia residual es elevada; sin embargo, al tratarse de una fibra sin ningún relieve superficial, provoca que la pérdida de adherencia se produzca antes que para el resto de las fibras analizadas.

Un mayor detalle del comportamiento a flexión puede encontrarse en las tablas a continuación, en la que se presentan los valores medios a los 28 días del (f_L) y de las resistencias residuales a flexotracción especificadas en la norma EN 14651 (2005) ($f_{R,1}$; $f_{R,2}$; $f_{R,3}$; $f_{R,4}$).

Tabla 3.11 – Resultados ensayo flexotracción hormigón Convencional (1ª Fase)

	HC_06_PP1	HC_06_PP2	HC_06_PP3	HC_20_B1	HC_19_FV1	HC_13_FV2
f_L [MPa]	4,21	4,22	3,71	4,07	4,17	3,51
Desv. Est. [MPa]	0,21	0,46	0,41	0,01	0,48	0,2
CV [%]	4,88	10,98	11,09	0,32	11,47	3,95
fr_1 [MPa]	1,65	0,94	2,03	0,11	0,4	0,61
Desv. Est. [MPa]	0,06	0,19	0,14	0,01	0,06	0,03
CV [%]	3,75	20,55	7,11	9,14	15,04	3,79
fr_2 [MPa]	2,22	1,15	2,49	-	0,07	0,78
Desv. Est. [MPa]	0,16	0,29	0,09	-	0,02	0,03
CV [%]	7,05	24,93	3,76	-	29,2	0,78
fr_3 [MPa]	2,55	1,26	2,34	-	-	0,94
Desv. Est. [MPa]	0,17	0,32	0,07	-	-	-
CV [%]	6,49	25,16	3,13	-	-	-
fr_4 [MPa]	2,74	1,31	2,02	-	-	0,92
Desv. Est. [MPa]	0,15	0,33	0,03	-	-	-
CV [%]	5,48	24,91	1,69	-	-	-

Tabla 3.12 – Resultados ensayo flexotracción hormigón Alta resistencia (1ª Fase)

	AR_06_PP1	AR_06_PP2	AR_06_PP3	AR_20_B1	AR_19_FV1	AR_13_FV2
f_L [MPa]	5,14	3,89	4,79	4,65	4,96	4,9
Desv. Est. [Mpa]	0,25	0,11	0,85	0,22	1,2	0,06
CV [%]	4,79	2,7	17,67	4,8	24,2	1,25
fr_1 [MPa]	1,35	1,11	1,6	0,2	0,78	0,77
Desv. Est. [Mpa]	0,15	0,22	0,17	0,1	0,97	0,01
CV [%]	10,81	19,79	10,59	47,6	24,2	1,83
fr_2 [MPa]	1,83	1,45	1,9	-	-	0,94
Desv. Est. [MPa]	0,24	0,34	0,29	-	-	0,05
CV [%]	13,33	23,73	15,17	-	-	5,74
fr_3 [MPa]	2,12	1,68	1,78	-	-	0,95
Desv. Est. [MPa]	0,28	0,35	0,2	-	-	0,03
CV [%]	13,22	21,1	11,16	-	-	3,42
fr_4 [MPa]	2,29	1,8	1,45	-	-	0,95
Desv. Est. [MPa]	0,32	0,35	0,1	-	-	0,01
CV [%]	13,75	19,65	7,21	-	-	1,45

En cuanto al comportamiento de la curva debido al tipo de hormigón, el caso de la amasada perteneciente PP1 presenta un flop promedio de 4,21 MPa y unas resistencias residuales asociadas a un CMOD de 3,5 mm de 2,55 MPa, siendo el mejor resultado postfisuración tanto en HC como en AR.

Otro resultado reseñable correspondiente al HC, PP2 presenta el mayor valor de f_{LOP} promedio de 4,22 MPa, la cual presenta una caída brusca ante su comportamiento postfisuración, no obstante, a medida que el CMOD aumenta, la carga residual aumenta de una manera moderada en donde a los 3,5 mm obtuvo una resistencia residual de 1,31 kN. En el caso de AR_06_PP2 presenta mejores resultados residuales en donde a los 3,5 mm adquirió una resistencia de 1,80 MPa, lo que supone un valor de 37% superior a la resistencia de fisuración. Mientras que en el caso de las amasadas PP3 el comportamiento es distinto, a mayor CMOD, menor resistencia residual.

En el caso de la amasada HC y AR B1 y FV1 las fibras no contribuyen al hormigón, puesto que en esta investigación no se observaron resultados con capacidad resistentes postfisuración.

Cabe señalar que los resultados de los ensayos a flexotracción presentan una alta dispersión. Sin embargo éstos se encuentran dentro de los valores habituales reportados en la literatura técnica, que normalmente se sitúan por encima del 20% (Parmentier *et al.*, 2008) y Molins *et al.*, 2009). Además, de acuerdo con (Vandewalle, 2006) la utilización de macrofibras (como en este caso) proporciona una dispersión mucho mayor en los resultados que si se hubieran utilizado microfibras.

3.3.6. Ensayo Barcelona

Con el objetivo de mostrar el comportamiento postfisuración de las distintas dosificaciones, la *Figura 3.13* representa las gráficas carga residual-desplazamiento axil (tras fisuración, etapa 3) correspondientes a todas las dosificaciones empleadas en la 1ª fase.

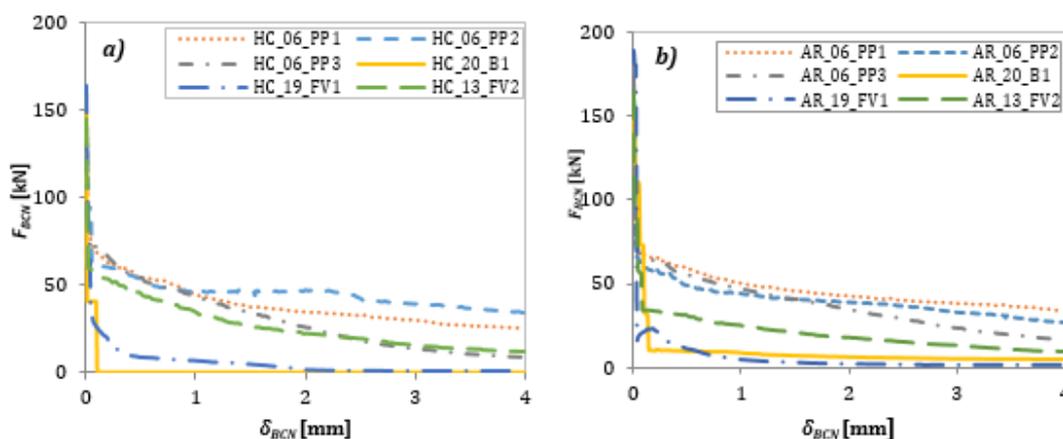


Figura 3.13 – Curva Carga-desplazamiento axil: HC 1ª Fase a). AR 1ª Fase b).

Tal y como muestra la *Figura 3.9a* en la fase 2 se produce una disminución de la rigidez respecto a la fase 1, fruto de la fisuración de la matriz. En este caso todos los

elementos con fibras derivadas de la poliolefina (PP1, PP2 y PP3) las caídas de la gráfica han sido moderada, con valores de cargas comprendidos entre 60 y 80 kN, en segunda instancia la amasada correspondiente a la fibra de vidrio (HC_13_FV2) presenta una caída de aproximadamente 55 kN. Mientras que en el caso de las amasadas correspondientes a las fibras de basalto y de vidrio (HC_20_B1 y HC_19_FV1) presentan la menor pendiente que las demás amasadas.

En el caso de las diferentes amasadas de AR (Figura 3.13b) presentan la misma tendencia en lo que corresponde la fase o etapa 2, donde las fibras de poliolefina (PP1, PP2 y PP3) presentan una caída moderada. En cuanto a la amasada correspondiente a AR_13_FV2 presenta la misma tendencia en la caída donde en este caso el valor $F_{R,0}$ es de un 57% menor. Al igual que en el caso de las amasadas correspondientes a las fibras de basalto y de vidrio (AR_20_B1 y AR_19_FV1) presentan los menores valores, lo cual confirman las tendencias observadas en los resultados de HC, donde ambas amasadas no reflejaron un comportamiento esperado.

La Tabla 3.13 muestra un resumen de las cargas residuales medias obtenidas experimentalmente (correspondientes a un desplazamiento de pistón de 2 y 4 mm a partir del punto de fisuración del ensayo) y su coeficiente de variación (donde expresa la magnitud de la dispersión respecto a la media de forma estandarizada) para cada serie de la 1ª fase.

Tabla 3.13 – Resultados ensayo Barcelona para un desplazamiento de pistón de 2 y 4 mm (1ª Fase)

			06_PP1	06_PP2	06_PP3	20_B1	19_FV1	13_FV2
HC	F_R [kN]	$\delta=2\text{mm}$	35	46,6	26,2	-	1,9	22,1
	C.V. [%]		1,92	4,2	12,2	-	1	5,82
	F_R [kN]	$\delta=4\text{mm}$	25,7	33,7	8,9	-	-	11,9
	C.V. [%]		1,59	1,1	5,7	-	-	5,29
AR	F_R [kN]	$\delta=2\text{mm}$	42,2	38,4	34,6	5,7	1,9	17,4
	C.V. [%]		7,02	6,94	19,13	6,49	0,18	9,62
	F_R [kN]	$\delta=4\text{mm}$	33,49	26,3	16,2	-	-	9
	C.V. [%]		4,48	6,26	9,3	-	-	5,55

Tal y como se puede apreciar, el coeficiente de variación del ensayo se sitúa, de forma general, en valores próximos a los obtenidos con el ensayo Barcelona (10%). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la población utilizada para obtener los valores medios es de cuatro probetas, con la finalidad de reducir la alta dispersión. Los resultados presentados en la Tabla 3.13 muestran consistentemente, mayores resistencias residuales a las amasadas correspondientes a las fibras derivadas de la poliolefina.

En el HC, para un desplazamiento del pistón de 2 mm, los resultados de HC_06_PP2 muestran una resistencia residual superior ante los demás resultados con un valor de 46,6 kN y al llegar a los 4 mm de desplazamiento sufre una caída moderada de un 38%. Al igual en la amasada correspondiente a HC_06_PP1 presenta una carga residual a los 2 mm de 35 kN y al llegar a los 4 mm sufre una caída de 36%. En cuanto al hormigón de AR, para un desplazamiento del pistón de 2 mm, los resultados correspondientes a la amasada AR_07_PP1 muestran una resistencia residual superior ante los demás resultados con un valor de 42,2 kN y al llegar a los 4 mm de desplazamiento sufre una caída moderada de un 26%. Siguiendo la amasada correspondiente a HC_07_PP2 presenta una carga residual a los 2 mm de 38,4 kN y al llegar a los 4 mm de desplazamiento presenta una caída de 46%.

En cuanto a las amasadas correspondientes a HC_06_PP3 presenta una carga residual menor ante los resultados analizados, y al llegar a los 4 mm de desplazamiento sufre una caída significativa de un 194%, y para la amasada HC_06_FV2 presenta una carga residual a los 2 mm de desplazamiento de 22,1 kN y al llegar a los 4 mm de desplazamiento sufre una caída de un 85%. Al igual que los hormigones de AR la amasada correspondiente a AR_06_PP3 Y AR_13_FV2 presentan la misma tendencia ante el HC, donde las PP3 presentan una carga a los 2 mm de 34,6 kN y al llegar a los 4 mm de desplazamiento presenta una caída de la curva de 213%. Finalmente, en el caso de la FV1 a los 2 mm de desplazamiento presenta una carga de 17,4 kN y la curva decrece a los 4 mm en un porcentaje de 93%.

3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: FASE II

3.4.1. Propiedades del hormigón en estado fresco

La Tabla 3.20 muestra los resultados de las propiedades del hormigón en estado fresco obtenidos de las probetas moldeadas durante la 2ª fase de la campaña experimental. En general, las diferentes amasadas presentaron una consistencia plástica-blanda, siendo distinta de la Fase I (consistencias líquidas), con la finalidad de asemejar tanto en la dosificación del hormigón, como en la consistencia necesaria a una puesta en obra para la fabricación de dovelas donde se emplean hormigones de consistencia plástica-blanda.

Tabla 3.14 – Propiedades del HC y AR en estado fresco (2ª fase)

Tipo de hormigón empleado	Código	Densidad [kg/m ³]	Aire Ocluido [%]	Asentamiento [cm]	Consistencia
Hormigón Convencional	HC_08_PP1	2383	3,8	5	Plástica
	HC_08_PP2	2397	3,8	8	Blanda
	HC_08_PP3	2350	4,0	1	Seca
	HC_20_FV2	2397	4,0	4	Plástica
Hormigón Alta Resistencia	AR_08_PP1	2370	3,3	5	Plástica
	AR_08_PP2	2397	3,4	5	Plástica
	AR_08_PP3	2355	4,0	3	Plástica
	AR_20_FV2	2405	3,0	4	Plástica

La densidad en estado fresco tanto de las amasadas del HC como de AR no presentan variaciones significativas en función de la fibra empleada. Se obtienen densidades comprendidas entre 2350 – 2410 kg/m³.

El contenido de aire ocluido en el HC presenta porcentajes muy similares entre sí, con valores del 3,8-4%. En general valores mayores a los de la 1ª fase de la campaña experimental, donde se obtuvieron valores comprendidos entre el 1,7 y el 3,25 %. Estos resultados ponen de manifiesto que el mayor contenido de aire ocluido puede deberse al incremento del volumen de fibras (del 0,7% al 0,9-1,1%), y al cambio realizado sobre el esqueleto granular.

Las amasadas presentan valores de aire ocluido en el entorno del 3,0 – 4,0%, inferiores a los valores obtenidos con los hormigones HC (3,8- 4,9 %). En este caso, consta que además del tipo de fibra, la dosificación y el esqueleto granular afecta al contenido de

aire ocluido, ya que mediante a una mayor cantidad de finos, ejerce un elemento conciliador de cara al contenido de aire ocluido del hormigón.

El hormigón de consistencia “seca” se corresponde al HC reforzado con fibra de poliolefina PP3. Estos presentan un mayor contenido de aire ocluido y un mayor número de fibras/por kg en la mezcla (100.000 fibras/kg frente a las 30000fibras/kg de las PP1 Y PP2). Ello pone de manifiesto que el tipo de fibra también influye de manera significativa a la consistencia y trabajabilidad del hormigón. En cambio, las fibras de poliolefina (PP1 y PP2) y la amasada correspondientes a la fibra de vidrio FV2, no han presentado dificultades relativas a la trabajabilidad del hormigón.

Finalmente, La dosificación empleada para los hormigones de alta resistencia ha permitido lograr un hormigón mucho más trabajable, incluso, para aumentar la cuantía en dosificaciones con 10 kg/m³ de fibras.

3.4.2. Velocidad Ultrasónica

La Tabla 3.14 muestra los resultados de las velocidades ultrasónicas (V.U.) obtenidos de las diferentes amasadas de HC y AR. La evaluación de la V.U. se ha realizado sobre las probetas cilíndricas de dimensión de $\varnothing 150 \times 300$ mm, a 7 y 28 días. Los valores obtenidos superan los 4700 m/s en todos los casos. Los resultados nos permiten calificar a los diferentes hormigones como de excelente calidad.

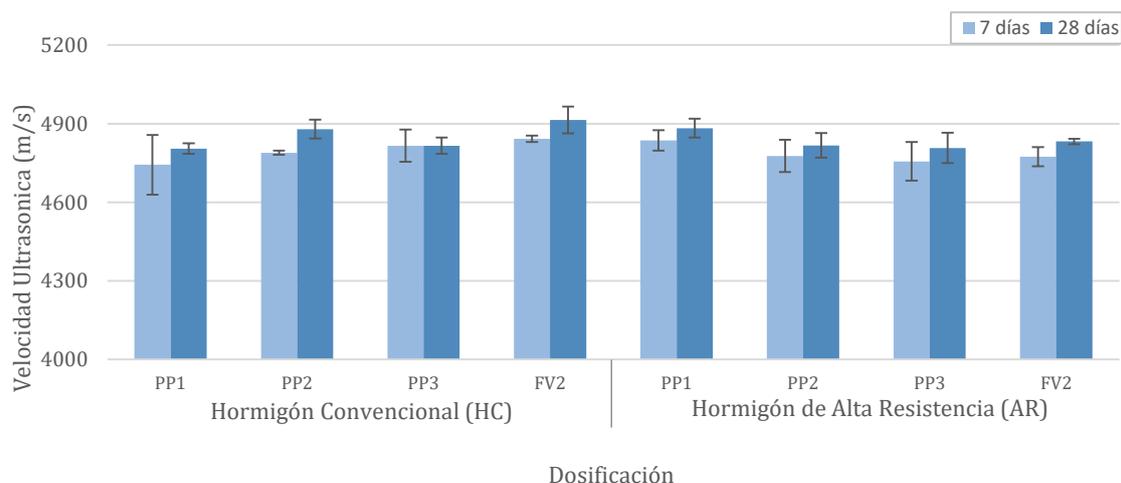


Figura 3.14 – Velocidad ultrasónica de las amasadas de HC y de AR (2ª fase)

En función del tipo de fibra y edad de la muestra, se producen pequeñas variaciones en la V. U. En todos los casos, las velocidades medidas a los 28 días tras su fabricación, presentan valores superiores que las muestras medidas a los 7 días.

En referencia al HC, los hormigones con fibras derivadas a la poliolefina presentan altas velocidades ultrasónicas, superiores a los 4500 m/s pertenecientes a una excelente calidad en el hormigón, mientras que los hormigones con fibras de vidrio (FV2) presentan desde edades de 7 días, altas velocidades ultrasónicas, superiores a los 4800 m/s. Por otra parte, en cuanto a los hormigones AR, las amasadas correspondientes a las fibras PP1, se obtienen los mejores resultados ultrasónicos tanto para 7 como a 28 días, con velocidades entre 4800 y 4930 m/s.

3.4.3. Determinación de la Densidad y Porosidad del hormigón

La Tabla 3.15 muestra los valores medios de los resultados de la densidad seca, aparente y porosidad accesible al agua de las amasadas correspondientes al HC y AR.

Tabla 3.15 – Resultados de la densidad seca y aparente (g/m^3) y porosidad accesible al agua (%) (2^a fase)

Tipo de hormigón empleado	Código	ρ seca [g/cm^3]	CV [%]	ρ aparente [g/cm^3]	CV [%]	Porosidad al agua %	CV [%]
Hormigón Convencional	HC_08_PP1	2,27	0,06	2,56	0,05	11,43	0,84
	HC_08_PP2	2,30	0,43	2,58	0,77	11,04	2,74
	HC_08_PP3	2,26	0,58	2,41	0,7	6,47	1,78
	HC_20_FV2	2,27	1,08	2,55	0,93	10,96	1,23
Hormigón Alta Resistencia	AR_08_PP1	2,25	0,07	2,56	0,23	12,08	2,12
	AR_08_PP2	2,28	0,1	2,58	0,14	11,62	1,83
	AR_08_PP3	2,25	2,92	2,42	3,15	7,25	2,85
	AR_20_FV2	2,23	0,3	2,37	0,41	6,16	1,74

En base a los datos del HC presentados en la Tabla 3.15, la densidad seca y aparente de las diferentes amasadas, no presenta variaciones significativas en función de la fibra empleada. Se obtienen densidades comprendidas entre 2,27-2,30 g/cm^3 y 2,41-2,56 g/cm^3 respectivamente. Mientras que la porosidad accesible al agua, presenta porcentajes comprendidos entre 6,37-11,43%, resultados que presentan un rango de valores esperables para un hormigón convencional.

De manera análoga, se observa que los valores del AR, la densidad seca y aparente de las diferentes amasadas, no presenta variaciones significativas. Se obtienen densidades comprendidas entre 2,23-2,32 g/cm^3 y 2,37-2,58 g/cm^3 respectivamente. En cuanto a la porosidad accesible al agua, presenta porcentajes comprendidos entre 6,16-12,08%, resultados que presentan un rango de valores esperables para un hormigón de alta resistencia.

3.4.4. Resistencia a Compresión

En la Tabla 3.16 se presentan los valores medios de la resistencia a compresión, junto con los valores de la desviación estándar y el coeficiente de variación para todas las series ensayadas de la 2^a fase.

Tabla 3.16 – Caracterización a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días (2^a fase).

Tipo de hormigón empleado	Código	Edad [días]	Promedio [MPa]	Desv. Estándar [MPa]	C.V. [%]	Edad [días]	Promedio [MPa]	Desv. Estándar [MPa]	C.V. [%]
Hormigón Convencional	HC_08_PP1	7	52,5	0,57	1,08	28	62,7	0,11	0,17
	HC_08_PP2		54,3	0,3	0,52		63,2	0,77	1,22
	HC_08_PP3		50,9	0,62	1,22		60,7	0,74	1,23
	HC_20_FV2		53,8	0,28	0,52		62,1	1,42	2,29
Hormigón Alta Resistencia	AR_08_PP1		48,9	2,72	5,55		62,6	0,41	0,66
	AR_08_PP2		50,1	1,07	2,13		60,1	1,92	3,19
	AR_08_PP3		51,7	1,72	3,32		62,4	0,95	1,53
	AR_20_FV2		52,3	0,44	0,84		57,9	4,92	8,49

Para la edad de 7 días, no se aprecian diferencias significativas entre los valores de resistencia a compresión en función del tipo de fibra. En lo que respecta a las amasadas de

HC el valor oscila entre los 54,3 MPa de la dosificación HC_08_PP2 y los 50,9 de la dosificación HC_08_PP3. En cuanto al hormigón (AR) el valor oscila entre los 52,3 MPa de la dosificación AR_20_FV2 y los 48,9 de la dosificación AR_08_PP1.

Estas pequeñas diferencias pueden ser reflejo de los problemas encontrados con la trabajabilidad de las mezclas, que se traduce en un vibrado más dificultoso, y una mayor porosidad en las probetas.

En lo que respecta a los resultados a la edad de 28 días, en todos los casos se sitúan por encima del rango exigido en numerosas aplicaciones estructurales (35 MPa), obteniendo valores de resistencia a compresión sobre los 57 MPa.

3.4.5. Módulo de elasticidad

En la Tabla 3.17 se muestran los valores de módulo de elasticidad para las diferentes amasadas, tanto de hormigón convencional como de alta resistencia. Puede observarse que, en general, no se aprecian diferencias significativas entre los diferentes valores, oscilando estos entre 36,2 y 39,1 GPa.

Tabla 3.17 – Caracterización del módulo elástico (E_{cm}) a los 7 y 28 días (2ª fase)

Tipo de hormigón empleado	Código	Promedio [GPa]	Desv. Est. [GPa]	C.V. [%]
Hormigón convencional	HC_08_PP1	37,74	0,59	1,56
	HC_08_PP2	39,06	0,54	1,38
	HC_08_PP3	36,85	0,63	1,7
	HC_20_FV2	38,62	0,82	2,13
Hormigón alta resistencia	AR_08_PP1	38,81	1,04	2,67
	AR_08_PP2	38,05	0,71	1,88
	AR_08_PP3	38,02	2,18	5,73
	AR_10_FV2	36,23	1,55	4,27

En lo que respecta a los resultados de módulos de elasticidad, al igual que los resultados a resistencia a compresión, en todos los casos se sitúan por encima del rango exigido en numerosas aplicaciones estructurales, obteniendo valores de módulos de elasticidad sobre los 36 GPa.

3.4.6. Ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007)

Con el fin de evaluar la repercusión de la incorporación de fibras en el aumento de la carga resistida por las probetas prismáticas en flexotracción, se analiza la Fase II correspondiente a los mejores resultados resistentes de la 1ª Fase con un mayor contenido de cuantía de fibras. La Figura 3.15 presentan la graficas Curva Carga-CMOD correspondientes a todas las series empleadas en la 2ª fase.

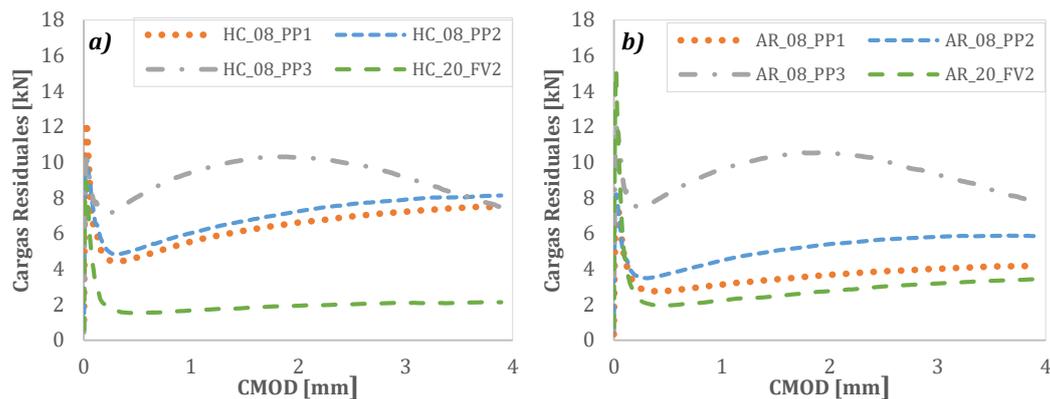


Figura 3.15 – Curva Carga-CMOD: HC 2ª Fase a). AR 2ª Fase b).

Al igual que la 1ª fase, se observa que el comportamiento en la zona elástica es similar para los dos tipos de hormigón, pero se aprecian diferencias en el comportamiento postfisuración. Es evidente que, para ambos tipos de hormigón, la fibra PP3 presenta las mejores resistencias residuales a pequeñas aberturas de fisura (0.5mm). Este comportamiento se deriva a la geometría y textura de la fibra, al ser una fibra de gran esbeltez, permite alcanzar alta resistencia residual; sin embargo, al tratarse de su textura (sin relieve), provoca una pérdida de adherencia y por consiguiente una pérdida de resistencia residual a mayores aberturas de fisuras.

Por otro lado, el comportamiento de las fibras PP1 y PP2, muestran comportamientos análogos, donde a aberturas de fisuras (0,5 mm) presentan resistencias residuales menores. Estas fibras cumplen con la tendencia que, a mayor tamaño de sección transversal de la fibra, existe una pérdida significativa de la respuesta inicial, pero esta tendencia es ganar a aberturas mayores, donde a los 3,5 mm de abertura muestran resistencias residuales mayores.

Un mayor detalle del comportamiento a flexión puede encontrarse en Tabla 3.18, donde se presentan los valores medios de los resultados del ensayo a flexotracción.

Tabla 3.18 – Resultados ensayo flexotracción HC y AR (2ª Fase)

	HC_08_PP1	HC_08_PP2	HC_08_PP3	HC_20_FV2	AR_08_PP1	AR_08_PP2	AR_08_PP3	AR_10_FV2
f_L [MPa]	4,00	3,38	4,58	4,22	3,93	4,09	3,96	4,82
Desv. Est. [MPa]	0,63	0,04	0,39	0,19	0,68	0,63	0,58	0,54
CV [%]	15,85	1,06	8,59	4,56	17,42	15,4	14,71	11,22
fr_1 [MPa]	1,46	1,70	2,57	0,71	1,51	1,73	2,55	0,61
Desv. Est. [MPa]	0,48	0,47	0,48	0,06	0,39	0,51	0,33	0,18
CV [%]	32,84	27,41	18,86	8,89	25,91	29,42	12,93	29,94
fr_2 [MPa]	1,94	2,28	3,24	0,84	1,58	2,34	3,21	0,77
Desv. Est. [MPa]	0,17	0,73	0,64	0,07	0,30	0,62	0,44	0,25
CV [%]	8,56	32,73	19,77	7,93	18,85	23,45	13,64	32,55
fr_3 [MPa]	2,19	2,61	3,18	0,94	1,79	2,63	3,12	0,95
Desv. Est. [MPa]	0,23	0,86	0,72	0,15	0,45	0,62	0,4	0,32
CV [%]	10,71	32,73	22,77	15,51	37,77	23,45	12,78	33,81
fr_4 [MPa]	2,34	2,73	2,73	0,98	1,92	2,73	2,62	1,05
Desv. Est. [MPa]	0,3	0,84	0,84	0,21	0,53	0,66	0,28	0,37
CV [%]	12,81	30,67	30,9	21,47	27,48	24,21	10,68	35,65

En primer lugar, los valores de f_{LOP} del HC comprende en resultados de 3,4 a 4,5 MPa, mientras que el hormigón de AR de 3,9 a 4,8 MPa, manifestando un aumento en la resistencia en función al tipo de hormigón, siendo los elementos de AR los de mayor valor sin ser influenciado el tipo de fibra. Estos valores demuestran que el valor F_{LOP} viene influenciado principalmente por la matriz de hormigón, y no de las fibras incorporadas.

Los elementos PP3 presentan unas resistencias residuales asociadas a un CMOD de 2,5 mm superiores a los demás elementos, y en comparación a la de menor resultado, presenta un 238% para el HC (Figura 3.15a), y de 228% para el AR (Figura 3.15d). Estos datos indican que existe una gran influencia en términos de carga residual en cuanto al tipo de fibra, en donde los mejores resultados presentan las fibras derivadas de la poliolefina.

3.4.7. Ensayo Barcelona

La Figura 3.19 representa las gráficas carga residual-desplazamiento axial correspondientes a todas las dosificaciones empleadas en la 2ª fase.

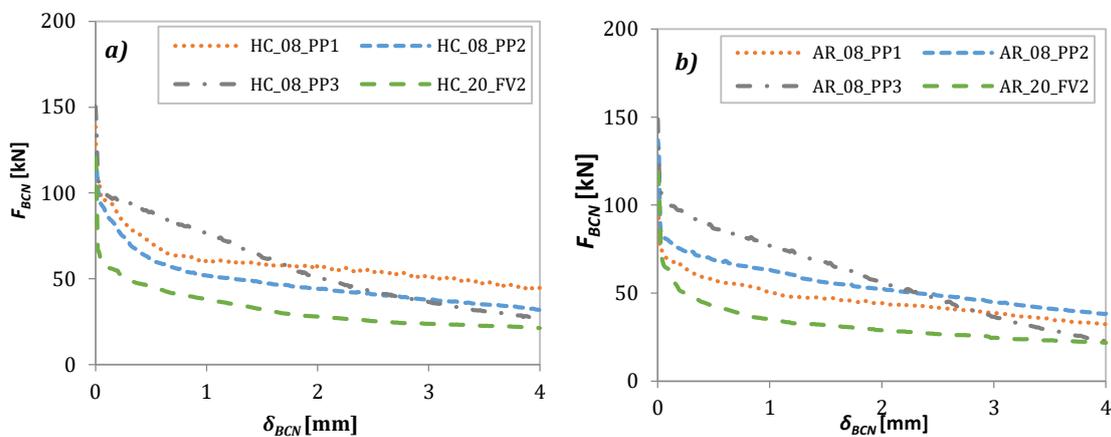


Figura 3.16 – Curva Carga-desplazamiento axial: HC 2ª Fase a). AR 2ª Fase b).

Al igual que los resultados obtenidos en el ensayo de flexotracción, la fibra de poliolefina PP3, presenta las mejores resistencias residuales en desplazamientos de pistón de hasta 2 mm, y al llegar a los 4 mm de desplazamiento de pistón sufre una caída significativa del 88%. Ésta pérdida es producida debido a la falta de adherencia entre matriz de hormigón y fibras, la cual hace que la resistencia tienda a converger con los valores de las fibras PP1 y PP2.

Asimismo, la amasada correspondiente a la fibra de vidrio, presenta el peor comportamiento residual ante los 2 tipos de hormigón. Esto se debe al problema de la textura de la misma afecta en los resultados, tal y como se ha comportado en los ensayos de flexotracción, lo cual era de esperarse por las características antes mencionada de las fibras.

La Tabla 3.19 muestra un resumen de las cargas residuales medias obtenidas experimentalmente (correspondientes a un desplazamiento de pistón de 2 y 4 mm a partir del punto de fisuración del ensayo) y el coeficiente de variación correspondiente a cada serie de la 2ª fase.

Tabla 3.19 – Resultados ensayo Barcelona para un desplazamiento de pistón de 2 y 4 mm (2ª Fase)

			08_PP1	08_PP2	08_PP3	20_FV2
HC	f_r [MPa]	$\delta=2\text{mm}$	1,46	1,11	1,28	0,7
	C.V. [%]		16,82	16,17	22,84	19,55
	f_r [MPa]	$\delta=4\text{mm}$	1,13	0,8	0,68	0,54
	C.V. [%]		18,95	11,29	46,65	15,78
AR	f_r [MPa]	$\delta=2\text{mm}$	1,11	1,31	1,44	0,73
	C.V. [%]		21,82	10,83	22,06	6,22
	f_r [MPa]	$\delta=4\text{mm}$	0,81	0,96	0,57	0,55
	C.V. [%]		38,54	29,85	33,49	22,64

En la citada tabla, es de notar que para desplazamientos de 2 y 4 mm el coeficiente de variación del ensayo de forma general, se sitúa en valores de aproximadamente 20%. Tal y como en la 1ª fase de la campaña experimental, se muestra consistentemente, mayores resistencias residuales a las amasadas correspondientes a las fibras derivadas de la poliolefina, y se cumple la tendencia antes vista, que, a mayor contenido de fibras en el hormigón, mayores resistencias residuales.

Comparando estos resultados con la 1ª fase, para las amasadas de HC, el incremento del contenido de fibras PP1 de 8 a 10kg/m³ no se traduce en una mejora de la respuesta residual del hormigón. Sin embargo, el comportamiento de la fibra PP1 frente al hormigón de AR, es de apreciarse el aumento de resistencia frente al incremento del contenido de fibra; a los 4 mm de desplazamiento la amasada de 08kg/m³ alcanza 0,81 MPa y la de 10kg/m³ 1,09 MPa, lo que supone un 35% superior.

3.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: FASE III

3.5.1. Propiedades del hormigón en estado fresco

La Tabla 3.20 presenta los resultados de las propiedades del hormigón en estado fresco obtenidos de las probetas moldeadas durante la 3ª fase de la campaña experimental. Las diferentes amasadas presentaron consistencias de blanda a seca, obedeciendo al tipo de fibra empleada por amasada.

Tabla 3.20 – Propiedades del AR en estado fresco (3ª fase)

Tipo de hormigón empleado	Código	Densidad [kg/m ³]	Aire Ocluido [%]	Asentamiento [cm]	Consistencia
Hormigón Alta Resistencia	AR_10_PP1	2360	3,4	8	Blanda
	AR_10_PP2	2410	3	3	Plástica
	AR_10_PP3	2388	3,2	4	Plástica
	AR_10_PP4	2395	3	4	Plástica
	AR_10_PP5	2392,5	3,2	5,5	Blanda
	AR_10_PP6	2392,5	2,5	5	Plástica
	AR_10_PP7	2395	3	3,5	Plástica
	AR_10_PP8	2367	4	2	Seca

La densidad en estado fresco de las diferentes amasadas, no presentan variaciones significativas en función de la fibra empleada. Se obtienen densidades comprendidas entre 2343 – 2395 kg/m³.

Al analizar el aire ocluido sí se aprecian influencias en función de la fibra empleada, tanto del tipo de material como de las características geométricas. Se obtienen contenidos de aire ocluido comprendidos entre 2,5 a 4,0 %. La amasada con mayor contenido de aire ocluido se presenta en la dosificación AR_10_PP8. Este contenido de aire ocluido pone de manifiesto que, durante el amasado y puesta en obra, la fibra de poliolefina (PP8), el material y las características geométricas conducen a una mayor oclusión de aire ocluido.

En cuanto a la consistencia del hormigón se aprecia que las diferentes amasadas se agrupan en 3 categorías: hormigones de consistencias secas 0-2 cm (AR_10_PP8), consistencias plásticas de 3,5 y 5 cm (PP1, PP2, PP3, PP4, PP6, PP7) y consistencias blandas de 5,5-9 cm (AR_10_PP5). Los hormigones de consistencia “seca” se corresponden a aquellos fabricados con fibras de poliolefina PP8. Estos presentan las menores densidades de las dosificaciones. Ello pone de manifiesto que el tipo de fibra también influye de manera significativa a la consistencia y trabajabilidad del hormigón.

3.5.2. Velocidad Ultrasónica

La Figura 3.17 muestra los resultados de la velocidad de ultrasonidos (V.U) de las amasadas. La evaluación de la V.U, al igual que la Fase II se ha realizado sobre las probetas cilíndricas de dimensión de $\varnothing 150 \times 300$ mm, a 7 y 28 días. Estos valores superan los 4600 m/s en todos los casos (incluso a los 7 días), lo cual nos permite calificar a los diferentes hormigones como de excelente calidad, según la clasificación dada en la Tabla 3.7.

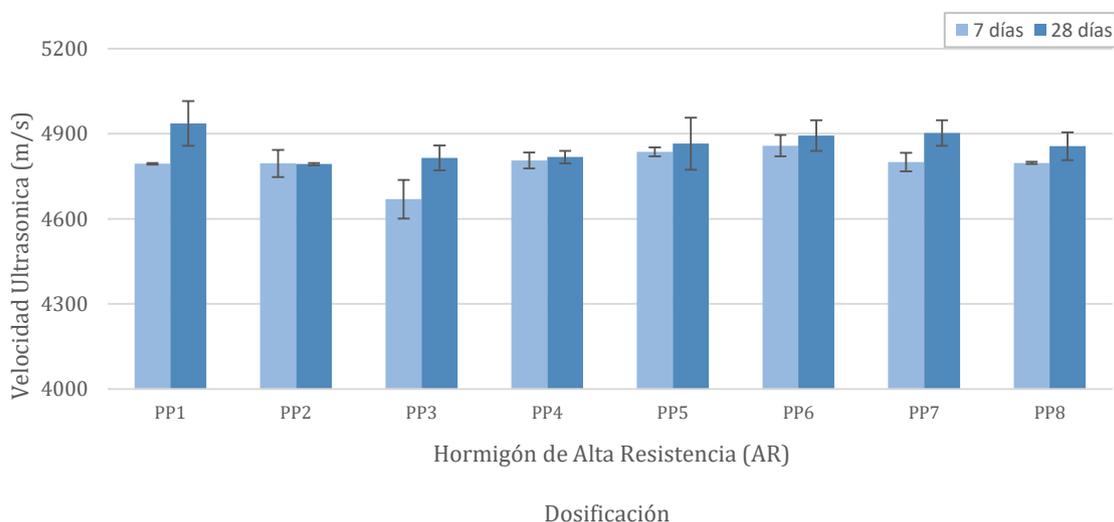


Figura 3.17 – Velocidad ultrasónica de las amasadas de hormigón de AR (3ª fase)

En la citada figura, se observa que, en función del tipo de fibra empleada, se producen variaciones en la V.U., donde las medidas a 28 días de curado, presentan valores superiores que las muestras a 7 días. Las velocidades ultrasónicas a 7 días, se obtienen resultados con velocidades entre 4669 y 4858 m/s, siendo la amasada correspondiente a la fibra PP3 con menor valor y la fibra PP6 la del resultado superior.

3.5.3. Determinación de la Densidad y Porosidad del Hormigón

La Tabla 3.21 muestra los resultados de la densidad seca, densidad aparente y porosidad media de las amasadas de hormigón de alta resistencia.

Tabla 3.21 – Resultados de la densidad seca y aparente (g/m^3) y porosidad accesible al agua (%) (3ª fase).

Tipo de hormigón empleado	Código	ρ seca [g/cm^3]	CV [%]	ρ aparente [g/cm^3]	CV[%]	Porosidad al agua %	CV[%]
Hormigón Alta Resistencia	AR_10_PP1	2,28	0,35	2,58	0,57	11,67	1,62
	AR_10_PP2	2,32	0,06	2,49	0,25	6,61	2,74
	AR_10_PP3	2,29	1,59	2,45	1,24	6,72	4,91
	AR_10_PP4	2,31	0,46	2,55	0,02	9,4	4,66
	AR_10_PP5	2,31	0,32	2,54	0,53	9,04	2,15
	AR_10_PP6	2,31	0,79	2,56	0,12	9,9	6,11
	AR_10_PP7	2,29	0,07	2,52	0,06	9,14	0,15
	AR_10_PP8	2,29	0,5	2,52	0,25	9,18	2,46

La densidad aparente de las diferentes amasadas, no presenta variaciones significativas en función de la fibra empleada. Se obtienen densidades comprendidas entre 2,45-2,58 g/cm^3 . En cuanto a la porosidad accesible al agua, presenta porcentajes comprendidos entre 6,61-11,67%, resultados que presentan un rango de valores esperables para un hormigón de alta resistencia.

3.5.4. Resistencia a Compresión

Las resistencias a compresión que se presentan en la Tabla 3.22 corresponden al valor medio, desviación estándar y el coeficiente de variación correspondientes a las probetas ensayadas para cada dosificación de la 3ª fase.

En lo que respecta a los resultados de resistencia a compresión a los 28 días se observa que todas las dosificaciones cumplen con el valor de diseño a 28 días (≥ 50 MPa). El valor oscila entre los 66,2 MPa correspondiente a la dosificación AR_10_PP1 y los 56,4 de la dosificación AR_10_PP7. Por otro lado, los porcentajes de aumento para estas dosificaciones de 7 a 28 días son similares, entorno del 22%.

Tabla 3.22 – Caracterización a compresión (f_{cm}) a los 7 y 28 días (3ª fase)

Tipo de hormigón empleado	Código	Edad [días]	Promedio [MPa]	Desv. Estándar [MPa]	C.V. [%]	Edad [días]	Promedio [MPa]	Desv. Estándar [MPa]	C.V. [%]
Hormigón Alta Resistencia	AR_10_PP1	7	51,4	3,77	7,33	28	66,2	0,15	0,23
	AR_10_PP2		49,9	1,17	2,35		58,4	0,16	0,28
	AR_10_PP3		53,5	1,24	2,32		61,7	0,76	1,24
	AR_10_PP4		50,7	4,7	9,2		57,3	0,6	1,03
	AR_10_PP5		49,5	7,4	14,91		63,5	5	7,88
	AR_10_PP6		46,1	0,1	0,11		57,1	3	5,33
	AR_10_PP7		45	1,3	2,9		56,4	8,2	14,49
	AR_10_PP8		51,7	0,9	1,74		61,4	4,9	8,03

Comparando los resultados de la 2ª fase con la 3ª fase, las probetas reforzadas con las fibras PP1 experimentan un aumento de resistencia significativo en función al contenido

de fibra de 8 a 10 kg/m³, con una diferencia porcentual de 10,4 %, siendo la amasada HC_10_PP1 la de mayor valor. En el caso de las probetas reforzadas con fibras PP3, al aumentar el contenido de fibras, se incrementa la resistencia un 2,3 %.

Sin embargo, con las fibras PP2 ocurre lo opuesto. A mayor contenido de fibra, la resistencia se reduce un 3,5 %, al igual a los resultados anteriores, es posible a una influencia en la saturación del hormigón. Por su parte, los resultados resistentes de HC mostrados en la Tabla 3.22 ratifican en su mayoría los resultados de velocidades ultrasónicas, en donde la amasada que presenta la mayor resistencia a compresión es la perteneciente al grupo de excelente calidad de hormigón.

3.5.5. Módulo de elasticidad

La Tabla 3.23 presenta los valores de módulo de elasticidad para las diferentes amasadas correspondientes a la 3ª fase.

Tabla 3.23 – Caracterización del módulo elástico (E_{cm}) a los 7 y 28 días (3ª fase)

Tipo de hormigón empleado	Código	Promedio [GPa]	Desv. Est. [GPa]	C.V. [%]
Hormigón alta resistencia	AR_10_PP1	38,1	1,29	3,37
	AR_10_PP2	37,32	0,61	1,62
	AR_10_PP3	35,81	0,48	1,35
	AR_10_PP4	36,9	0,36	0,98
	AR_10_PP5	37,7	0,45	1,19
	AR_10_PP6	37,8	1,05	2,78
	AR_10_PP7	38,0	0,44	1,17
	AR_10_PP8	37,8	0,77	2,05

Por lo general, no se aprecian diferencias significativas entre los diferentes valores, oscilando estos entre 36 y 38 GPa, siendo el AR_10_PP8 la serie de mayor módulo elástico y la amasada AR_10_PP3 la de menor módulo elástico.

Comparando los resultados de la 2ª fase con la 3ª fase se observa una influencia del contenido de fibras, presentando un comportamiento análogo a los ensayos de compresión. En el caso de la amasada correspondiente a las fibras PP1, manifiesta un aumento del módulo de elasticidad en función del contenido de fibra, resultando al mayor contenido de fibra un 17% superior. En cuanto a las fibras PP2 y PP3, sucede lo contrario: el aumento del contenido de fibra produce una reducción del módulo de elasticidad del 1,3 y 0,6 % respectivamente. En el caso de las fibras de vidrio con igual contenido de fibra, se produce una reducción del módulo de elasticidad del 6,6 % del hormigón AR respecto el HC.

3.5.6. Ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651:2007)

La Figura 3.18 presentan la graficas Curva Carga-CMOD correspondientes a todas las series empleadas en la 3ª fase. La gráfica presenta muestra los resultados de dosificaciones de hormigón de AR, correspondiente a las fibras derivadas de la poliolefina con un contenido de fibra de 10 kg/m³.

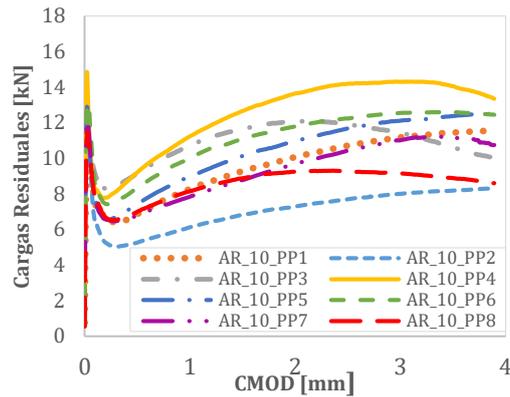


Figura 3.18 – Curva Carga-CMOD del AR 3ª Fase

A partir de cada tipo de fibra se observan distintas tendencias. Las amasadas correspondientes a la fibra PP4 y PP6, presentan las mejores resistencias residuales, con la tendencia de recibir las mejores resistencias residuales a mayores aberturas de fisura. A los 0,5 mm de abertura de fisura alcanza un valor de 2,89 y 2,63 MPa respectivamente, y al llegar a los 3,5 mm de abertura incrementa la resistencia residual hasta los 4,41 y 3,97 MPa respectivamente. Este comportamiento residual, responde a la geometría y textura de la fibra. Al tratarse de una fibra de gran esbelteza, su resistencia residual es elevada.

En el caso de la amasada correspondiente a la fibra de poliolefina (PP1, PP5 y PP7), presenta un comportamiento postfisuración similar a las amasadas PP4 y PP6 pero con menores resistencias residuales.

Estos comportamientos parecidos en las fibras derivadas de la poliolefina, se deben a la similitud en sus propiedades técnicas de las fibras como la textura, diámetro equivalente, etc. Estos tipos de fibras cumplen la tendencia esperada, de que si aumentamos el tamaño de la sección transversal de la fibra vamos a perder la respuesta inicial entre 0,5 y 1, pero la tendencia es ganar a mayores aberturas, dependiendo la adherencia que propicie la fibra.

El comportamiento del hormigón reforzado con la fibra (PP2 y PP8) presentan la menor respuesta residual de todas las amasadas. Este comportamiento residual, responde a la geometría y textura lisa de la fibra, ello provoca una pérdida de adherencia a llegar a la abertura de 3,5 mm.

Un mayor detalle del comportamiento a flexión puede encontrarse en Tabla 3.24, donde se presentan los valores medios de los resultados del ensayo a flexotracción.

En primer lugar, los resultados de f_{LOP} de las dosificaciones antes estudiadas, se evalúa que los hormigones reforzados con la fibra PP4, presenta la mayor resistencia, con valores promedios de 4,72 MPa. En segundo lugar, los hormigones reforzados con las fibras (PP5, PP6 y PP7), muestran valores de 3,99; 4,22 y 4,46 MPa.

Finalmente, los resultados con menor valor de f_{LOP} , corresponden a los hormigones reforzados con las fibras (PP1, PP2, PP3 y PP8) con valores promedios de 3,58; 4,12; 4,00 y 3,67 MPa, respectivamente.

Tabla 3.24 – Resultados ensayo flexotracción hormigón Alta Resistencia (3ª fase)

	AR_10_ PP1	AR_10_ PP2	AR_10_ PP3	AR_10_ PP4	AR_10_ PP5	AR_10_ PP6	AR_10_ PP7	AR_10_ PP8
f_i [MPa]	3,58	4,12	4,00	4,72	3,99	4,22	4,46	3,67
Desv. Est. [Mpa]	0,38	0,23	0,38	0,83	0,02	0,1	0,12	0,19
CV [%]	10,63	5,55	9,53	17,67	0,58	2,42	2,8	5,15
fr₁ [MPa]	2,11	1,65	2,84	2,89	2,23	2,63	1,68	2,19
Desv. Est. [Mpa]	0,03	0,14	0,58	0,25	0,62	0,41	0,17	0,15
CV [%]	1,3	8,76	20,32	8,85	27,65	15,58	9,82	6,82
fr₂ [MPa]	2,86	2,13	3,62	3,97	3,06	3,5	2,56	2,77
Desv. Est. [Mpa]	0,2	0,29	0,71	0,34	0,9	0,51	0,25	0,17
CV [%]	6,88	13,62	19,67	8,51	29,36	14,58	9,94	6,19
fr₃ [MPa]	3,3	2,4	3,7	4,45	3,45	3,86	3,24	2,9
Desv. Est. [Mpa]	0,27	0,43	0,64	0,43	0,92	0,58	0,43	0,21
CV [%]	8,16	17,77	17,19	9,59	26,61	15,09	13,19	7,21
fr₄ [MPa]	3,52	2,55	3,31	4,41	3,56	3,97	3,52	2,78
Desv. Est. [Mpa]	0,34	0,5	0,46	0,49	0,82	0,65	0,5	0,24
CV [%]	9,74	19,74	13,93	11,19	23,16	16,51	14,22	8,51

Las amasadas correspondientes a las fibras derivadas de la poliolefina (PP4 y PP6), presentan las mejores resistencias residuales, con la tendencia de recibir las mejores resistencias residuales a mayores aberturas de fisura. No obstante, presentan una dispersión no mayor al 20%, encontrándose dentro de los valores habituales reportado de la literatura técnica.

En el caso de las amasadas correspondientes a las fibras (PP2, PP7 y PP8), presentan menores resistencias residuales, en comparación con las antes mencionadas, siendo las de menores dispersiones en sus resultados, situándose en un rango del 2 al 14% del CV. Mientras que las fibras (PP1, PP3 y PP5), a pesar de presentar resultados residuales satisfactorios, obtiene la mayor dispersión en sus resultados alcanzando a valores del 30% del CV.

3.5.7. Ensayo Barcelona

La Figura 3.19 representa las gráficas carga residual-desplazamiento axil correspondientes a todas las dosificaciones empleadas en la 3ª fase.

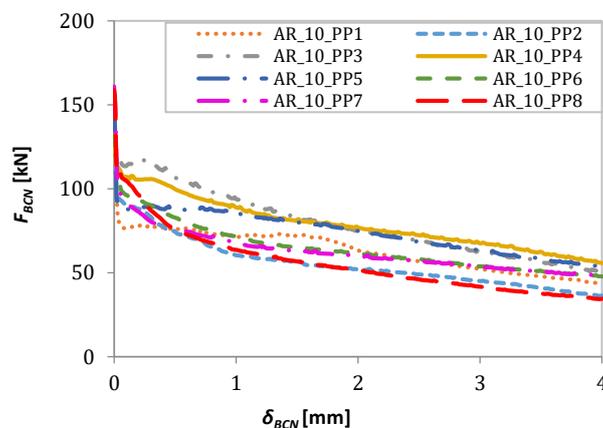


Figura 3.19 – Curva Carga-desplazamiento axil de AR 3ª Fase

La Figura 3.19 muestra que para un desplazamiento de pistón de 2 mm la amasada AR_10_PP4 presenta la mayor resistencia residual con un valor de 1,95 MPa, y al llegar a los 4 mm de desplazamiento presenta una caída de un 39%. En cuanto a la fibra PP3 inicia con la mayor resistencia residual, pero a mayor desplazamiento de pistón se observa de manera significativa la pérdida de resistencia.

En cuanto a los hormigones reforzados con fibras PP1, PP6 y PP7, muestran un comportamiento análogo entre sí, presentando un comportamiento residual similar a las amasadas PP4, pero con menores resistencias residuales. Sin embargo, los hormigones reforzados con las fibras PP2 y PP8 presentan las menores resistencias residuales ante todos los elementos ensayados.

La Tabla 3.25 muestra un resumen de las cargas residuales medias obtenidas experimentalmente y el coeficiente de variación correspondiente a cada serie de la 3ª fase.

Tabla 3.25 – Resultados ensayo Barcelona para un desplazamiento de pistón de 2 y 4 mm (3ª Fase)

		10_PP1	10_PP2	10_PP3	10_PP4	10_PP5	10_PP6	10_PP7	10_PP8	
AR	f_r [MPa]	$\delta=2\text{mm}$	1,58	1,31	1,9	1,95	1,89	1,55	1,51	1,29
	C.V. [%]		8,98	9,87	8,32	11,9	38,94	10,53	7,47	15,45
	f_r [MPa]	$\delta=4\text{mm}$	1,09	0,92	1,26	1,4	1,35	1,2	1,21	0,87
	C.V. [%]		27,32	16,38	12,64	15,58	7,93	13,72	11,27	29,88

Al igual que en el ensayo a flexotracción, la amasada correspondiente a la fibra PP4, presenta el mejor comportamiento residual ante las demás fibras. De manera general, es de notar que, para desplazamientos de 2 mm, el coeficiente de variación del ensayo, se sitúa en valores de aproximadamente 20% exceptuando las amasadas de la fibra derivada de la poliolefina (PP5), donde alcanza una dispersión en los resultados de hasta 39%.

Sin embargo, para los desplazamientos de 4 mm el coeficiente de variación se sitúa en un rango menor al 16% de dispersión, exceptuando las amasadas correspondientes a las fibras de poliolefina (PP1 y PP8), donde alcanzan una dispersión en los resultados de hasta un 30%. Al igual que todas las fases, hay que tener en cuenta que la población utilizada para obtener los valores medios es de cuatro probetas, con la finalidad de evitar una alta dispersión en los resultados.

3.6. CRITERIO DE CONSIDERACION DE FIBRAS ESTRUCTURALES MEDIANTE LA NORMATIVA MC-2010

Este apartado analiza el comportamiento experimental a flexotracción de los distintos tipos de fibra, en función de la cuantía de fibras empleada. De esta manera se podrá deducir como afecta el tipo de fibra y su cuantía en su respuesta mecánica frente a este tipo de esfuerzos.

Las fibras a estudiar, son aquellas fibras derivadas de la poliolefina que se dispone más de una cuantía de fibra (PP1, PP2 y PP3), y además la fibra que ha presentado la mejor prestación estructural estudiada en esta tesis doctoral (PP4).

Principalmente se analizarán como varían las distintas resistencias residuales que caracterizan a los HRF en función del tipo de fibra y de la cantidad de fibras empleada. Además, se diferenciará para hormigones convencionales (HC) y para los hormigones de alta resistencia (AR), siempre que se pueda. Se prestará especial atención a los valores de la resistencia residual $f_{R,1}$ que es el valor de referencia para el Estado Límite de Servicio (ELS), al igual que para la $f_{R,3}$, que supone el valor de referencia correspondiente al Estado Límite Último (ELU).

3.6.1. Criterio de consideración de fibras estructurales

Con la finalidad de considerar si un tipo de fibra para una cuantía dada es estructural o no, se sopesa el criterio de la normativa Model Code-2010. Este criterio se establece para asegurar que se dota al hormigón de suficiente resistencia residual a flexotracción como para resistir este tipo de esfuerzos. El criterio es el que se define a continuación:

- $f_{R,1}/f_{LOP} > 0,4$
- $f_{R,3}/f_{R,1} > 0,5$

Para poder considerar un tipo de fibra y una cuantía como estructural deben cumplirse las dos condiciones anteriores.

3.6.2. Comparativa de resistencias residuales para cada tipo de fibra y cuantía

Antes de analizar cada tipo de fibra por separado en función de la cuantía de fibras, se compara el comportamiento de las distintas fibras de origen polímero referente a las resistencias residuales. Esta comparativa se realizará para un hormigón de alta resistencia y cuantías de fibra de 10 kg/m^3 ya que es la que tienen en común todas ellas.

En la Figura 3.18 (Resultados de flexotracción de la 3ª fase) se aprecia que la fibra que mejor comportamiento tiene según las resistencias residuales es la fibra PP4, ya sea para la resistencia residual $f_{R,1}$ como la $f_{R,3}$. Esta fibra tiene una resistencia residual correspondiente al Estado Límite de Servicio de prácticamente 3 MPa, debido a su corta longitud. Asimismo, presenta una resistencia residual correspondiente al Estado Límite Último muy elevada, aproximadamente de 4,5 MPa, por tratarse de una fibra de gran esbeltez. De igual manera la fibra PP6 presenta un comportamiento muy similar, pero con valores un 11% y un 15% menores de resistencia residual $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$ respectivamente.

En cuanto al comportamiento de la fibra PP3 también se aprecia resistencias residuales $f_{R,1}$ muy elevadas, debido a su corta longitud. No obstante, la resistencia residual para aberturas de fisura mayores se reduce considerablemente, debido exclusivamente al disponer de una superficie lisa. Esta última condición produce que la pérdida de adherencia sea mayor y por lo tanto la pérdida de resistencia residual también lo sea.

Fibra: PP1

La fibra PP1, de origen polimérico, se define para 3 cuantías distintas: 6, 8 y 10 kg/m^3 , considerando un hormigón de(AR). Cabe destacar que los datos mostrados a continuación, son tomados de los datos de flexotracción correspondientes a las 3 fases de la campaña experimental. La Tabla 3.26 resume los resultados del criterio definido por MC-2010.

Tabla 3.26 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras estructurales o no correspondiente a la fibra PP1.

AR_PP1		
$C_f=6 \text{ kg/m}^3$	$C_f=8 \text{ kg/m}^3$	$C_f=10 \text{ kg/m}^3$
$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,26$	$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,38$	$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,59$
$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,57$	$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,19$	$F_{R,3}/F_{R,1} = 0,85$

*Los resultados en rojo presenta que no se cumple el criterio

La anterior tabla muestra que para las fibras PP1 solo se puede considerar como estructural cuando la cuantía de fibras es de como mínimo 10 kg/m^3 . Para el resto de casos las fibras no se pueden considerar como estructurales, porque la relación entre la resistencia F_{LOP} y la $f_{R,1}$ es menor que 0,4, esto significa que la reducción de la resistencia pico es mayor que el 60%. La segunda condición siempre se cumple, esto es debido a que este tipo de fibras presentan un comportamiento con tendencia al “hardening”, ya que la resistencia residual aumenta para mayores anchos de fisura.

Fibra: PP2

La fibra PP2, también de origen polimérico, se define para 3 cuantías distintas: 6, 8 y 10 kg/m^3 . Además, también considerando un hormigón de Alta resistencia. La Tabla 3.27 resume los resultados del criterio definido por MC-2010.

Tabla 3.27 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras estructurales o no correspondiente a la fibra PP2.

AR_PP2		
$C_f=6 \text{ kg/m}^3$	$C_f=8 \text{ kg/m}^3$	$C_f=10 \text{ kg/m}^3$
$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,29$	$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,42$	$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,40$
$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,51$	$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,51$	$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,45$

*Los resultados en rojo presenta que no se cumple el criterio

La siguiente tabla muestra que las fibras PP2 se pueden considerar como estructurales cuando la cuantía de fibras es de 8 y 10 kg/m^3 . Para el resto de casos las fibras no se pueden considerar como estructurales, porque la relación entre la resistencia F_{LOP} y la $f_{R,1}$ es menor que 0,4. Como era de esperar, la segunda condición siempre se cumple.

Fibra: PP3

La Tabla 3.28 resume los resultados del criterio definido por MC-2010, definidos por la fibra PP3.

Tabla 3.28 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras estructurales o no correspondiente a la fibra PP3.

AR_PP3		
$C_f=6 \text{ kg/m}^3$	$C_f=8 \text{ kg/m}^3$	$C_f=10 \text{ kg/m}^3$
$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,33$	$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,64$	$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,71$
$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,11$	$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,22$	$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,30$

*Los resultados en rojo presenta que no se cumple el criterio

Al igual que los resultados correspondientes a la fibra PP2, la siguiente tabla muestra que las fibras PP3 se pueden considerar como estructurales cuando la cuantía de fibras es de 8 y 10 kg/m^3 .

Fibra: PP4

A continuación, se presenta los resultados correspondientes a la fibra PP4, aquellas fibras que ha presentado la mejor prestación estructural del apartado anterior. La Tabla 3.29 resume los resultados del criterio definido por MC-2010.

Tabla 3.29 – Resultados de criterio de MC-2010 para la consideración de fibras estructurales o no correspondiente a la fibra PP4.

AR_PP4
$C_f=10 \text{ kg/m}^3$
$F_{R,1}/F_{LOP} = 0,61$
$F_{R,3}/F_{R,1} = 1,54$

**Los resultados en rojo presenta que no se cumple el criterio*

Como era de esperarse, según el criterio del MC-2010 las fibras PP4 puede considerarse como estructurales cuando la cuantía de fibras es de 10 kg/m^3 .

3.7. CONCLUSIONES

Se han presentado en este capítulo los resultados más relevantes de una amplia campaña experimental de HRFnM. Se ha observado la influencia en sus propiedades y el comportamiento de las variables consideradas. Sobre estas variables se ha podido caracterizar el hormigón mediante la ejecución de distintos ensayos y determinar la influencia del tipo y contenido de fibra o del tipo de hormigón. En donde el hormigón de AR reforzado con la **fibra PP4** y una cuantía de **10 kg/m^3** presenta los mejores resultados tanto para las propiedades físicas como mecánicas, considerándolo un hormigón estructural.

En base a los resultados obtenidos de cada fase, se pueden derivar las conclusiones descritas a continuación.

- En la **fase I** los HC y los de AR cumplen con los requisitos referentes a resistencia en general. En cuanto al comportamiento postfisuración cumple con el estado fenomenológico mostrado en el *capítulo 2* donde: el hormigón en masa, las fibras y la interacción entre ambos materiales refleja la creciente contribución de las fibras tras la rotura de la matriz del hormigón hasta una tensión residual, exceptuando los hormigones diseñados con las fibras de Basalto (B1) y fibra de vidrio (FV1). Siendo los hormigones de fibras de derivadas de la poliolefina: (PP1) los que presentan las mejores respuestas residuales.
- En la **fase II** se observa que las propiedades físicas no se ven influenciadas significativamente en función de la fibra empleada. A pesar de obtener mayores contenidos de fibras que la fase I, la nueva dosificación empleada ha permitido lograr hormigones trabajables, incluso para aumentar la cuantía a dosificaciones de 10 kg/m^3 de fibras.

En cuanto a las propiedades mecánicas, el aumento del contenido de fibras no ha repercutido en los resultados de la resistencia a compresión ni en el módulo de elasticidad, pero sí en el comportamiento postfisuración del material, donde a mayor contenido de fibra provoca un aumento de la resistencia residual del material.

Las amasadas correspondientes a las fibras PP3, obtienen las mejores resistencias residuales, con la tendencia de recibir las mejores respuestas residuales a pequeñas aberturas de fisuras (0,5 mm), pero presenta una disminución de la resistencia residual para mayores aberturas de fisuras. Este comportamiento residual, responde a la geometría y textura de la fibra.

Nuevamente, las fibras derivadas de la poliolefina presentan los mejores resultados en resistencia residual, siendo la fibra de vidrio (FV2) la que presenta el peor comportamiento residual, debido a su geometría y falta de textura superficial, lo que provoca un deslizamiento y falta de anclaje entre la matriz de hormigón y las fibras.

- En la **fase III** los hormigones reforzados con fibras derivadas de la poliolefina: (PP4) y (PP6), presentan las mejores resistencias residuales para menores y mayores aberturas de fisuras.

4. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE POISSON EN FIBRAS NO METÁLICAS

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han estudiado aspectos de significativa importancia referente a la caracterización del hormigón reforzado con fibras correspondiente a distintos tipos de fibras no metálicas. Sin embargo, con la finalidad de garantizar la viabilidad estructural de las mismas, se ha abordado una caracterización del comportamiento del hilo madre, considerando aspectos relevantes como la resistencia a tracción y módulo de elasticidad.

Aunque muchos autores reconocen la importancia del coeficiente de Poisson desde el punto de vista numérico, pocas publicaciones relacionadas sobre la evaluación experimental de esta propiedad (Hu *et al.*, 2009; Tscharnuter *et al.*, 2011). En este sentido, la evaluación y la optimización del coeficiente de Poisson en fibras no metálicas es de gran interés.

La determinación del coeficiente de Poisson debe realizarse directamente sobre las fibras no metálicas seleccionadas en capítulos anteriores. Sin embargo, la pequeña sección transversal de la fibra compromete la evaluación experimental de la propiedad. La

geometría del material corresponde a una de las barreras responsables a la falta de estudios, lo cual limita el potencial de mejorar este parámetro en el material.

Con el fin de determinar el coeficiente de Poisson en un número de fibras sintéticas estructurales seleccionadas, este capítulo presenta detalles sobre un nuevo procedimiento experimental creado por el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC, en donde se expone detalles del método experimental y el algoritmo desarrollado, con la finalidad de presentar, analizar y validar la medida del Coeficiente de Poisson.

4.1.1. Objetivos

El objetivo general del presente capítulo, es el de determinar el coeficiente de Poisson de seis macrofibras sintéticas seleccionadas, a partir de un nuevo método experimental.

Para ello, los objetivos específicos que se persiguen con este estudio son:

- Definir e implementar un método experimental para evaluar el coeficiente de Poisson de fibras plásticas estructurales.
- Medir el coeficiente de Poisson en un número de macrofibras plásticas (seleccionadas del Capítulo 3).
- Validar los resultados mediante medidas de la deformación longitudinal a partir de un método convencional (técnica de medición de contacto).

4.1.2. Organización del estudio

Este capítulo se ha organizado en dos fases: la primera fase presenta la campaña experimental empleada para la determinación del coeficiente de Poisson (*apartado 4.2*), mientras que la segunda fase presenta el análisis de los resultados referente al ensayo empleado, en donde aborda los datos referentes a la caracterización mecánica, resultados del coeficiente de Poisson en fibras sintéticas y finalmente una validación experimental del método empleado (*apartado 4.3*).

4.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.2.1. Selección de fibras

De cara a evaluar la influencia de las fibras en respuesta del coeficiente de Poisson, se han seleccionado seis tipos de fibras plásticas estructurales, utilizadas en el capítulo 3 de la presente Tesis Doctoral, que corresponden a seis fibras sintéticas. Las macrofibras sintéticas a estudiar, son derivadas de la poliolefina y cada una de ellas contienen distintas características geométricas que se observan a continuación. La nomenclatura adoptada y las principales características físicas de las distintas fibras se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 – Características de las fibras

	Dimensiones [mm]			Curvatura	Textura	Imagen
	Longitud	ancho	espesor			
PP1	60	1,30	0,50	Media	Rugosa	
PP2	48	1,40	0,40	Media	Rugosa	
PP3	48-58	1,40	0,05	Baja	Lisa	
PP4	48	1,30	0,52	Media	Rugosa	
PP5	60	1,50	0,50	Media	Rugosa	
PP6	39	0,80	0,75	Alta	Rugosa	

En el capítulo anterior se ha tomado en consideración los principales parámetros físicos que caracterizan las fibras sintéticas, como su longitud (l), su diámetro equivalente (d), esbeltez (l/d), su módulo de Elasticidad (E) entre otras, pero poca atención se le ha dado a su característica geométrica y o textura.

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, como su material y geometría los cuales juegan un papel crucial para evitar los arrancamientos con mayor facilidad. En la Tabla 4.1 se ha catalogado su forma mediante a su curvatura (espesor/ancho), en ella se ha tomado en consideración como una curvatura baja a valores $<0,15$, valores medios a los comprendidos entre $0,15 < x < 0,50$ y finalmente las curvaturas altas a las $> 0,50$. Con la finalidad de estudiar los diferentes comportamientos se determina mediante el ensayo a tracción.

4.2.2. Ensayo a tracción

A fin de determinar el coeficiente de Poisson se ha de realizar el ensayo a tracción de las fibras seleccionadas. Para muestras de filamentos, se colocan directamente en la máquina de ensayo (directamente en las mordazas) protegiéndolas con papel adhesivo o cintas (A. Bunsell, 2009). Sin embargo, debido a la corta longitud de las fibras a ensayar (comprendidas entre 39 y 60 mm), exige de técnicas especiales para determinar sus características mecánicas. A continuación, se describe la técnica empleada en la presente Tesis Doctoral (Cáceres *et al.*, 2016).

Para el sistema de sujeción se utiliza una malla textil llamada Etamine, en ellas se colocan las fibras individuales. A cada malla se le realiza un corte central de geometría rectangular de 10 x 15 mm, mientras que la longitud de anclaje varía en función de la

longitud de la fibra. Tomando en cuenta las recomendaciones de la normativa (ASTM C1557-03, 2008), la longitud de anclaje adoptada es 1,5 veces la longitud de la longitud del ensayo.

La Figura 4.1 presenta el método de sujeción de la fibra a la malla textil. Consta de dos elementos principales: un marco delantero (Figura 4.1a) y dos placas textiles traseras (Figura 4.1b). La fibra se coloca entre estos dos elementos y se fija con un adhesivo sintético compuesto de cianoacrilato de secado rápido. La configuración final de la muestra se ilustra en la Figura 4.1c. Las dimensiones específicas del marco representadas son adecuadas para fibras con una longitud de entre 55 y 60 mm.

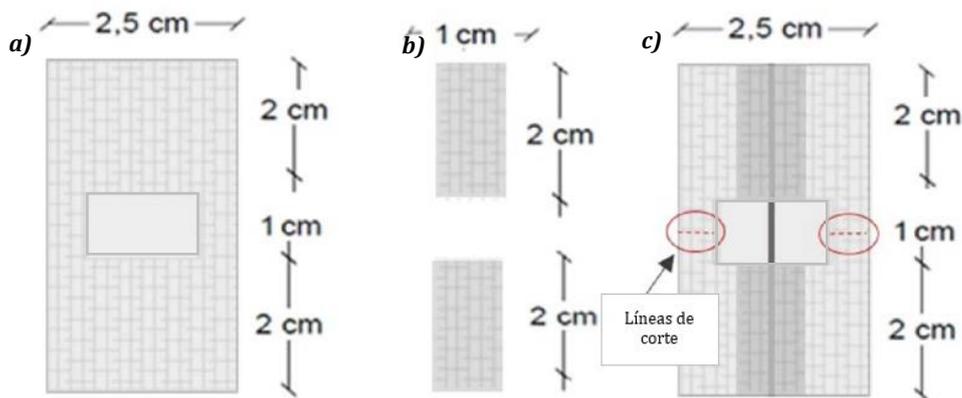


Figura 4.1 – Muestra del marco textil: dimensiones del marco frontal a). láminas textiles pegadas en la parte posterior b). Fibra adherida a la malla textil c).

El marco es cuidadosamente sujetado por las mordazas de la máquina, (Figura 4.2a) asegurando una correcta alineación de la fibra. Previo al ensayo, se realizan cortes desde cada lado hasta el corte central (Figura 4.1c), lo que garantiza que la fibra sea la única que cargue durante el ensayo (Figura 4.2b). Y finalmente, antes de iniciar el ensayo, se aplica una precarga de 10 N. Los ensayos a tracción se realizaron en el Laboratorio de la Innovación tecnológica de Estructuras y Materiales de la UPC, Terrasa. El ensayo se realiza en la máquina electromecánica marca MTS modelo Insight con una capacidad de 10 kN, con una velocidad de carga de 9 mm/min, controlada por el desplazamiento del pistón.

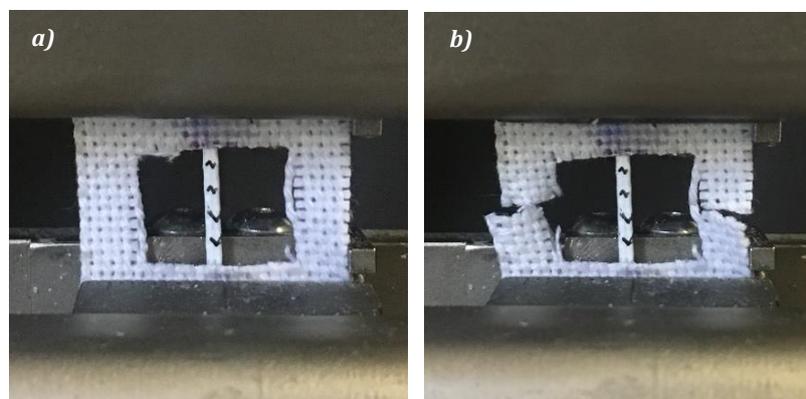


Figura 4.2 – Procedimiento del ensayo a tracción: Colocación de la muestra a). Corte del marco b).

4.2.3. Metodología de la determinación del coeficiente de Poisson

En la actualidad existen pocos métodos para determinar el coeficiente de Poisson de un material (Hu *et al.*, 2009). Por lo general, el material se somete a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura, donde el coeficiente de Poisson se calcula a partir de las deformaciones transversales y longitudinales. Sin embargo, los métodos de medición del coeficiente de Poisson vía convencional, son difíciles de aplicar a materiales similares a las fibras debido a su pequeño diámetro. En este caso, las técnicas de medición de contacto, como el clip o los extensómetros, pueden llevar a resultados poco fiables debido al peso del dispositivo y otros movimientos provocados por el contacto. (McClung *et al.*, 2011; R.H. Pritchard *et al.*, 2013).

Hoy en día, técnicas de medición óptica se adoptan ampliamente para obtener mediciones sin contacto como la interferometría de Moiré, la interferometría de patrón de moteado electrónica y la correlación de la imagen digital (DIC). Sin embargo, la mayoría de estas técnicas no se pueden aplicar directamente en las fibras sintéticas ya que no se cumplen ciertos requisitos con respecto al tamaño de la muestra, adicionando al coste de aquellas técnicas con tecnología láser, que podrían ser un coste muy elevado.

Para esta investigación se ha desarrollado un nuevo procedimiento de medida sin contacto, con la finalidad de evaluar el coeficiente de Poisson mediante el método DIC 2D modificado, el cual es capaz de medir el movimiento longitudinal y transversal con un solo dispositivo de captura de imágenes. A continuación, se describe en detalle la metodología desarrollada *ad hoc*, que comprende de los siguientes pasos:

a) Preparación de la muestra

Teniendo en cuenta que el principio básico del 2D DIC es el seguimiento (o emparejamiento) de los puntos exactos (de píxeles) entre dos imágenes grabadas antes y después de la deformación. Para ello, las regiones de interés deben presentar patrones identificables con el cual se pueda rastrear a lo largo del ensayo.

Por lo general, se logra aplicando una distribución de intensidad de gris en la superficie de la muestra a través de un patrón de moteado aleatorio. Sin embargo, este enfoque no se puede implementar debido a la geometría de las muestras a ensayar, debido al pequeño diámetro que poseen las fibras (menor a 1 mm). Por ello, se ha desarrollado un nuevo método con un procedimiento alternativo capaz de controlar las deformaciones.

El nuevo método se basa en medir las deformaciones transversales a través de patrones únicos en escala de grises, aplicando un color blanco mate en la superficie de las fibras, y contrastando con un fondo negro. Los bordes de la muestra se pueden definir claramente por el cambio abrupto en la intensidad de grises entre la región del fondo y la superficie de la fibra, donde la Figura 4.3 muestra esquemáticamente el enfoque adoptado. Teniendo en cuenta que las fibras que ya presentan color blanco mate pueden no estar pintada en blanco, ya que representa una diferencia en las intensidades de escala de grises con el fondo.

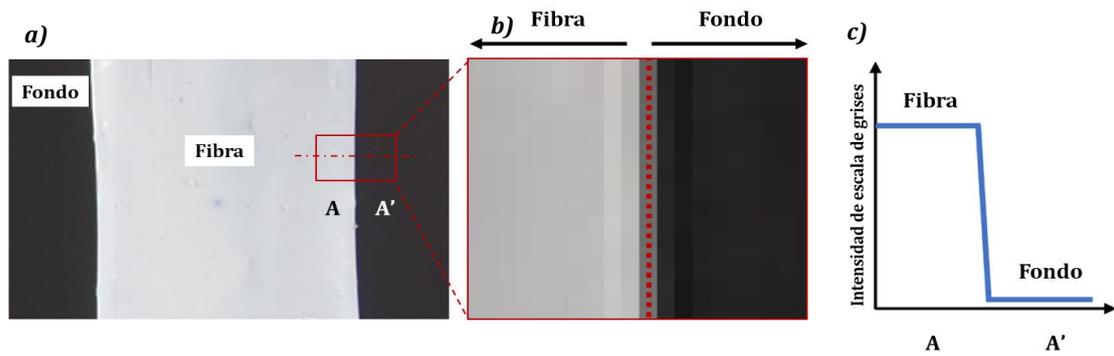


Figura 4.3 – Representación esquemática: Fibra pintada de blanca sobre un fondo negro a). Detalle de la interfaz entre la fibra y el fondo b). Cambios en la intensidad de escala de grises ente la fibra y el fondo c).

Varios métodos se han evaluado para determinar el enfoque referente a las marcas de referencias que detallan las mediciones del desplazamiento longitudinal (cartón sobre el marco textil, cartón sobre la fibra y marcas sobre la fibra). Después de varias pruebas, se ha decidido medir el componente vertical de los desplazamientos, pintando finas marcas horizontales color negra a lo largo de la longitud de la fibra. La Figura 4.4 muestra el aspecto visual de la fibra PP4 antes del ensayo.



Figura 4.4 – Configuración final de la fibra previo al ensayo.

El número, la ubicación y la forma de las marcas longitudinales se deben de evaluar cuidadosamente, con la intención de evitar medir en regiones cercanas a los bordes, para así facilitar la identificación de puntos únicos en las imágenes antes y después del ensayo.

b) Sistema de captura de imágenes

La Figura 4.5 muestra los principales componentes del sistema de captura de imágenes empleada. La cámara utilizada se presenta en la Figura 4.5a, correspondiente a la Olympus OM-D-M10 Mark III, equipada con un objetivo macro ZUIKO ED 30 mm 1: 3.5 y un flash macro STF-8. Para soportar la cámara se ha utilizado un trípode Berno TGP27A (Figura 4.5b), finalmente para estabilizar y controlar con precisión la distancia entre la lente y la fibra, se ha utilizado una placa deslizante de micro-posicionamiento Manfrotto 454 (Figura 4.5c).

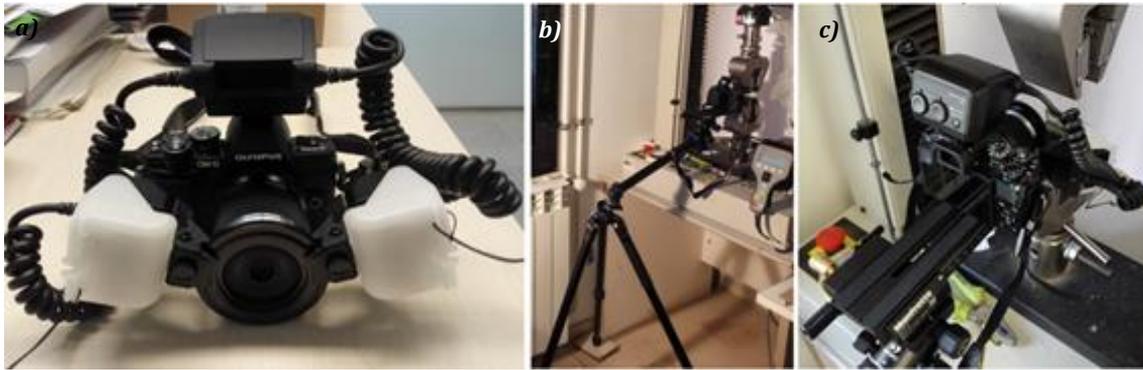


Figura 4.5 – Sistema de captura de imágenes: Cámara + flash externo a). Trípode b). Placa deslizante de micro-posicionamiento.

Con la intención de maximizar el número de píxeles que cubren el ancho de la fibra en las imágenes, la lente debe colocarse lo más cerca posible de la muestra. La lente seleccionada se utiliza específicamente en macrofotografías debido a su gran relación de ampliación (2.5:1 en comparación con las relaciones 1:1 que son las típicas en otras lentes) y a la vez una corta distancia de enfoque, lo que permite colocar la lente de la cámara a 4 cm de distancia.

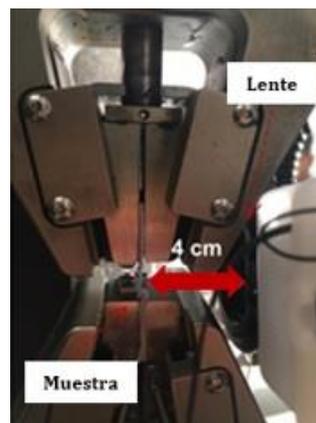


Figura 4.6 – Visión detalla de la distancia entre la muestra y la lente de la cámara.

La cámara se debe colocar en el eje óptico normal a la superficie de la muestra, formando imágenes planas en diferentes estados de carga. Se deben realizar varias sesiones de fotos para definir los ajustes de la cámara (ISO, apertura y velocidad de obturación) además, una configuración óptima del flash externo con la intención de mejorar la calidad de la imagen digital. Los ajustes finales adoptados fue la ISO 200. Apertura $f / 5,6$, velocidad de obturación $1/40$ s e intensidad del flash externo $1/16$. Las fotos se toman cada un segundo, desde el inicio del ensayo a tracción hasta la rotura del material.

c) Algoritmo de procesamiento de imágenes

Se ha desarrollado un algoritmo de procesamiento de imágenes en código MATLAB *ad hoc* para analizar las imágenes capturadas durante el ensayo a tracción y así obtener el coeficiente de Poisson de las diferentes fibras evaluadas. La Figura 4.7 describe en detalle los diferentes pasos incluidos en el algoritmo, con la finalidad de determinar el coeficiente de Poisson.

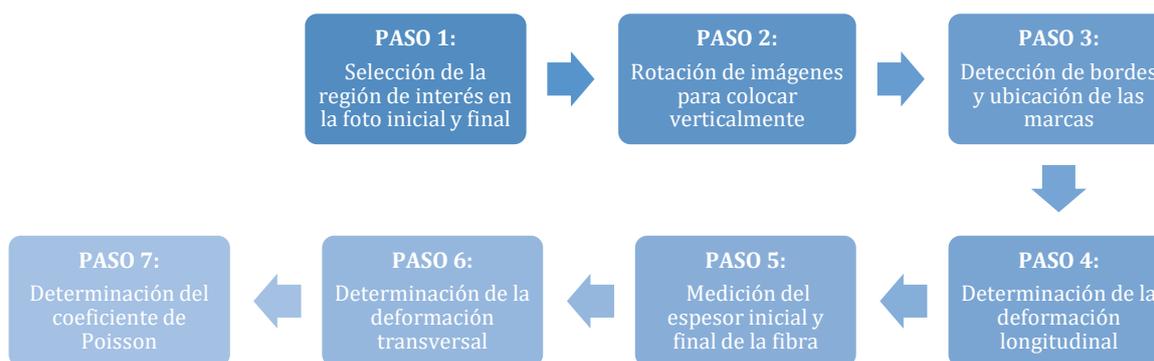


Figura 4.7 – Pasos para evaluar el algoritmo de procesamiento de imágenes.

Paso 1: Selección de la región de interés en la foto inicial y final, la región debe incluir las cuatro marcas pintadas en la fibra (Figura 4.4) y además se debe seleccionar parte del fondo negro.

Paso 2: Rotación de imágenes para colocar verticalmente, el cual consiste en seleccionar las cuatro esquinas de la fibra tanto inicial como final, comenzando desde la esquina superior izquierda en el sentido de las agujas del reloj, siempre indicando el sentido de la rotación a emplear.

Paso 3: Detección de bordes y ubicación de las marcas, con la intención de identificar los bordes horizontales y verticales se emplea un algoritmo de detección de los bordes basado en método Canny (Canny, 1986). Encuentra los bordes buscando los máximos locales del gradiente de imagen, basándose en la primera derivada.

Este método se utiliza, ya que toma el valor de cero en todas las regiones donde no varía la intensidad y tiene un valor constante en toda la transición de intensidad. Por tanto, un cambio de intensidad se manifiesta como un cambio brusco en la primera derivada, característica que es usada para detectar un borde, y en la que se basa el algoritmo de Canny (Rebaza, 2014).

Los valores umbral se fijaron en $[0,01-0,09]$, donde cada borde de la marca se define identificando la coordenada de los mismos 4 puntos singulares (píxeles) en la imagen inicial y final. Para determinar el algoritmo de Canny se debe llevar a cabo:

- La obtención del gradiente: Se calcula la magnitud y la orientación del vector gradiente en cada píxel, realizando un filtro gaussiano a la imagen original, con el objetivo de suavizar la imagen.
- Supresión no máxima: El borde de una imagen puede apuntar en diferentes direcciones, por lo que el algoritmo de Canny utiliza cuatro direcciones para detectar horizontal, vertical y diagonal en los bordes de la imagen borrosa. El operador de detección de bordes devuelve un valor para la primera derivada en la dirección horizontal (Gy) y la dirección vertical (Gx). A partir de éste punto, es posible determinar el gradiente de borde y la dirección mediante las ecuaciones:

$$G[(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) \end{bmatrix} \quad [4-1]$$

Siendo un vector perpendicular al borde, donde el vector G apunta en la dirección de variación máxima de f en el punto (x, y) por unidad de distancia, con la magnitud y dirección dadas por:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = |G_x + G_y| \quad [4-2]$$

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad [4-3]$$

- Histéresis de umbral: en este paso se aplica una función de histéresis basada en dos umbrales; con este proceso se pretende reducir la posibilidad de aparición de contornos falsos.

Paso 4: Determinación de la deformación longitudinal, se calcula en las tres regiones creadas entre las marcas, midiendo la distancia en píxeles entre el borde superior e inferior de la región de la imagen inicial y final. Las áreas cubiertas por las marcas no se consideran en el análisis, ya que podrían presentar distorsiones causadas por la tinta. Para cada región se obtienen 4 valores de deformación longitudinal. El valor medio de la deformación longitudinal es el promedio de 12 mediciones.

Paso 5: Medición del espesor inicial y final de la fibra, las imágenes RBG iniciales y finales se convierten en imágenes binarias, reemplazando todos los píxeles de la imagen original con una luminancia superior a un nivel de umbral de valor uno (color blanco) y reemplazando los demás píxeles con valor cero (negro).

El valor de umbral se determina minimizando la dispersión dentro de cada segmento, pero al mismo tiempo que sea lo más alta posible entre distintos segmentos mediante el método de Otsu (1979).

En cuanto a la exposición matemática, se toma como partida dos segmentos de puntos ($K_0(t)$ y $K_1(t)$) definidos por el valor umbral t . Siendo $p(g)$ la probabilidad de ocurrencia del valor de gris $0 < g < G$, entonces la probabilidad de ocurrencia de los píxeles en los dos segmentos es:

$$K_0: P_0(t) = \sum_{g=0}^t p(g) \text{ y } K_1: P_1(t) = \sum_{g=t+1}^G p(g) = 1 - P_0(t) \quad [4-4]$$

Si el valor \bar{g} es considerado la media aritmética de los valores en gris de toda la imagen, y \bar{g}_0 ; \bar{g}_1 los valores medios dentro de cada segmento, entonces las variancias se calculan:

$$\sigma_0^2(t) = \sum_{g=0}^t (g - \bar{g}_0)^2 p(g) \text{ y } \sigma_1^2(t) = \sum_{g=t+1}^G (g - \bar{g}_1)^2 p(g) \quad [4-5]$$

Con la intención de mantener la variancia dentro de cada segmento lo más pequeña posible se obtiene:

$$Q(t) = \frac{\sigma_{zw}^2(t)}{\sigma_{in}^2(t)} \quad [4-6]$$

Finalmente, la variancia dentro de los segmentos se obtiene:

$$\sigma_{zw}^2(t) = P_0(t) (\bar{g}_0 - \bar{g})^2 + P_1(t) (\bar{g}_1 - \bar{g})^2 \quad [4-7]$$

$$\sigma_{in}^2(t) = P_0(t) \sigma_0^2(t) + P_1(t) \sigma_1^2(t) \quad [4-8]$$

Paso 6: Determinación de la deformación transversal. Para el algoritmo empleado, las deformaciones transversales se calculan por cada fila de píxeles, tomando en consideración la variación del ancho antes y después de la carga. Para su determinación solamente se miden las regiones que conforman la parte inferior de la primera marca sucesiva de la parte superior de la siguiente, obteniendo finalmente 3 regiones por muestra.

Dado al efecto del alargamiento de la fibra, el número de filas que cubren la imagen aumenta, por lo que dificulta el proceso de localizar los puntos exactos de la imagen inicial con la final, conocido como el problema de apertura (MA. Sutton *et al.*, 2009). Sin embargo, en esta aplicación, los puntos finales de cada región están cubiertos en el análisis.

Paso 7. Determinación del coeficiente de Poisson definida como la relación entre las deformaciones transversales y axiales. Se calcula para todas las secciones dentro de cada región seleccionada en el algoritmo. La ecuación se define:

$$\nu = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \quad [4-9]$$

4.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados presentados en este apartado se estructuran en tres secciones. Inicialmente se pretende analizar la caracterización mecánica del material, traducidos al ensayo a tracción uniaxial de las fibras. Posteriormente, se presenta el análisis de los resultados, derivados de la metodología desarrollada para determinar el coeficiente de Poisson. Finalmente, se procede a un método de validación de la metodología mediante a la deformación longitudinal del método por ensayos de deformación axial medidas por un extensómetro externo.

4.3.1. Caracterización mecánica: Ensayo a tracción uniaxial

Las diferentes propiedades de las fibras se reflejan en su rendimiento mecánico, como la carga de tracción máxima y su deformidad antes del fallo. Los resultados del ensayo de la resistencia a tracción uniaxial de las seis fibras seleccionadas se muestran en la Figura 4.8.

La Tabla 4.2 presenta los resultados de la tensión de las macrofibras sintéticas. Cada resultado presenta los valores medios correspondientes a seis ensayos por fibra, la desviación estándar y el coeficiente de Poisson.

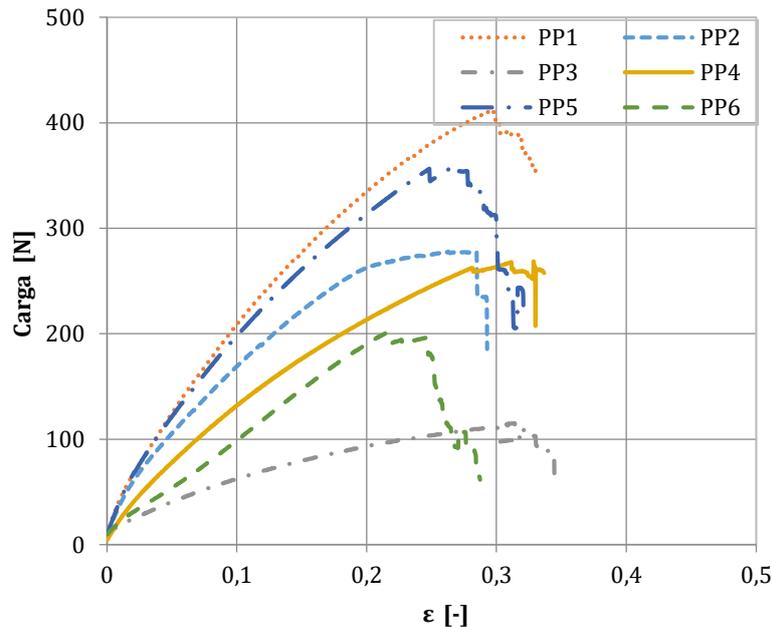


Figura 4.8 – Curva Carga – deformación de las muestras

Tabla 4.2 – Resultados de la tensión y deformación última de las fibras.

Promedio			
Código	Carga última [N]	Desv. Est. [N]	C.V. [%]
PP1	418,2	26,86	6,42
PP2	280,83	8,95	3,19
PP3	115,6	8,76	7,78
PP4	275,5	13,18	4,78
PP5	385,83	24,26	6,29
PP6	219,17	24,6	11,23

A partir de los resultados de las cargas máximas de tracción del ensayo, se realizan diversas observaciones. Con respecto a estos análisis, se pueden distinguir en tres grupos: Las fibras con cargas últimas comprendidas entre 385,8 y 418,2 N (PP1 y PP5) correspondientes a los valores superiores (Figura 4.9a). En un grupo intermedio (PP2, PP4 y PP6), cargas comprendidas entre 219,1-280,8 N (Figura 4.9b). Finalmente, el tercer grupo, correspondiente a la carga última inferior, referente a la fibra PP3 con un valor de 115,6 N (Figura 4.9c).

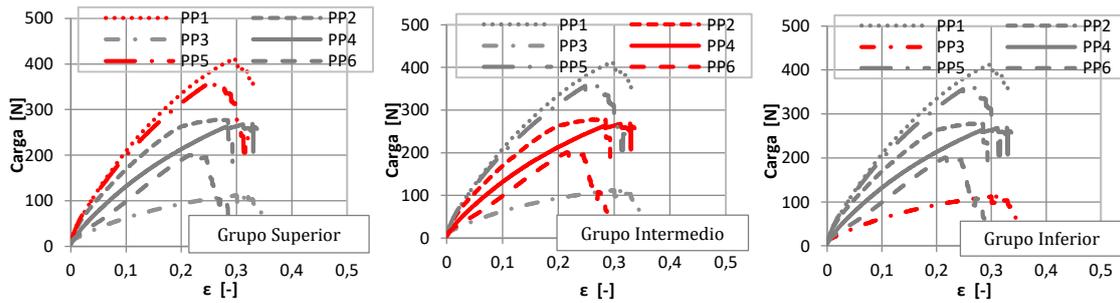


Figura 4.9 – Curva Carga – deformación: grupo superior a). grupo intermedio b). grupo inferior c).

Al analizar las variaciones en la tensión última, se aprecian influencias en función de la fibra empleada, tanto de las características geométricas (dimensión y textura). En cuanto al primer grupo, corresponden a las fibras con mayor carga de tracción, lo que podría explicarse por la gran sección de estos elementos.

En el caso del grupo intermedio, también se deben a la similitud en sus propiedades técnicas en las fibras como su textura (rugosa) con curvaturas medias, obteniendo valores de 275 y 280 N, exceptuando la fibra PP6 la cual presenta anchos y espesores menores, presentando curvaturas altas (espesor/anchos $\geq 0,5$), lo cual este tipo de fibras provoca un fallo por deslizamiento debido a su similitud de (espesor/anchos) llegando a un valor de 0,94, mientras las demás sobre un valor de 0,4.

Por otro lado, las cargas últimas del tercer grupo corresponden a la fibra lisa (sin relieve) con un valor medio de 115 N, este tipo de material, cumple con su comportamiento mecánico, en donde presentan las secciones significativamente más bajas que las demás evaluadas, lo que restringe el rendimiento de este material.

Para todos los casos, estos resultados se pueden conducir como válidos debido a que presentan coeficientes de variación no mayor al 11,2%. En general, las fibras con relieve superficial presentan una carga máxima entre 220 a 418 N con un coeficiente de variación de un máximo de 11,2 %, mientras que la fibra sin relieve presenta las menores resistencias con un promedio de 115 N y un coeficiente de variación de 7,8%. Con respecto al modo de rotura, se ha identificado dos tipos de fallo durante el ensayo a tracción. Un mayor detalle de los tipos de rotura puede encontrarse en las imágenes mostradas a continuación (Figura 4.10).

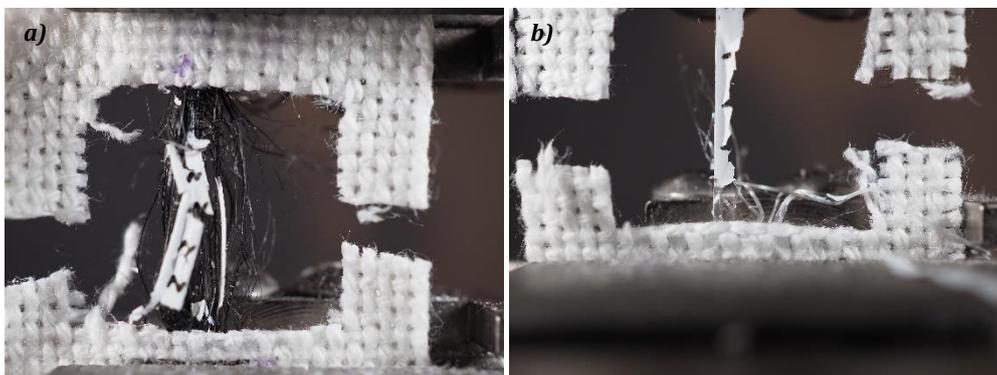


Figura 4.10 – Típico modo de rotura (PP1) a). Modo de rotura de la fibra sin relieve (PP3) b).

La Figura 4.10a muestra el modo típico de rotura, correspondiente a las fibras con relieve, en este caso correspondiente a la fibra PP1. En la mayoría de los casos, se observaron evidencias de daños locales previo a la rotura de la fibra. Este fallo previo a la rotura se ve reflejado en el descenso de la carga previo a la rotura final del ensayo, indicado en la gráfica $P - \epsilon$ indicado en la Figura 4.8, en donde se aprecia mayor influencia en las fibras PP5 y PP6. Por otra parte, la Figura 4.10b, presenta otro tipo de modo de rotura, en este caso las fibras PP3 se han roto en varias tiras más anchas, provocando una reducción de la resistencia.

4.3.2. Determinación del coeficiente de Poisson

Las imágenes digitales capturadas durante el ensayo a tracción, se han analizado mediante el algoritmo de procesamiento de imágenes descritas en el sub-apartado 4.2.3, inciso c). Para cada fibra se mide el coeficiente de Poisson previo a la rotura conocido como el ν último, considerando la imagen final como la foto anterior a la rotura. Los resultados del coeficiente de Poisson se muestran en la Figura 4.11 y en la Tabla 4.3, en ellas presentan los valores medios del coeficiente de Poisson de las seis fibras analizadas, junto a la desviación estándar, que para la gráfica es representado en barras de error (correspondientes a una desviación estándar de $+1/-1$). Finalmente, la nomenclatura empleada para las fibras se describe en el sub-apartado 4.2.1.

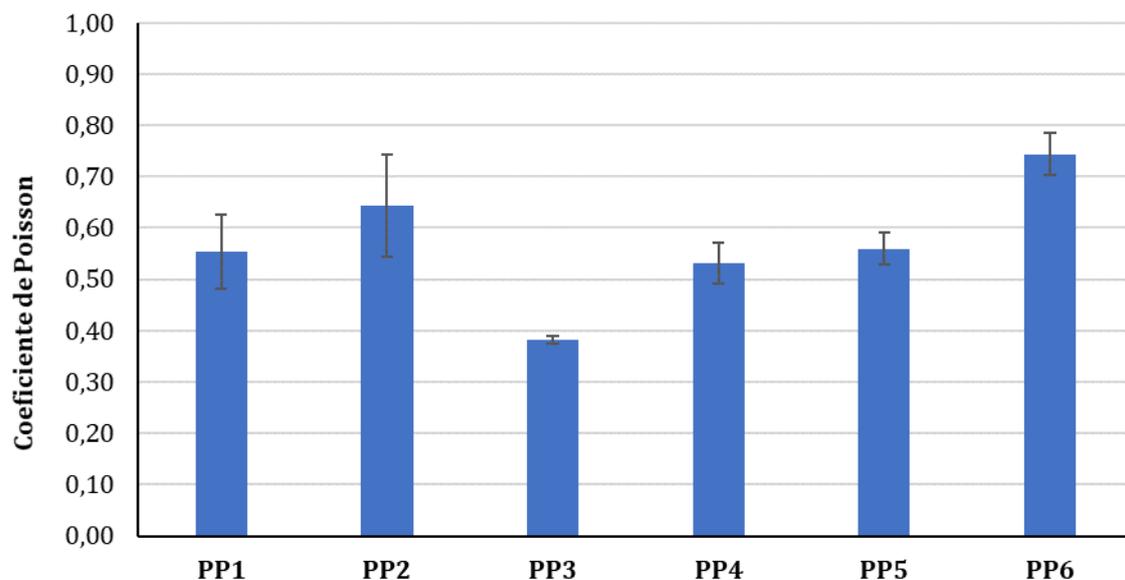


Figura 4.11 – Coeficiente de Poisson de las fibras sintéticas evaluadas

Tabla 4.3 – Resultados del coeficiente de Poisson de las fibras sintéticas evaluadas

	Coeficiente de Poisson [-]	Desv. Est. [-]	CV [%]
PP1	0,554	0,07	13,07
PP2	0,643	0,10	4,47
PP3	0,383	0,00	1,94
PP4	0,530	0,04	7,50
PP5	0,559	0,03	5,49
PP6	0,743	0,04	5,42

Los resultados del coeficiente de Poisson de los seis tipos de fibras, muestran valores comprendidos entre 0,38 y 0,74. Los valores del coeficiente de variación oscilan del 4% al 13%. Por lo general esta variabilidad es baja, lo cual indica que las mediciones son confiables, en donde las diferencias observadas entre las fibras son estadísticamente significativas. Estas diferentes muestras se diferencian en 3 grupos: valores superiores a 0,60, valores comprendidos entre 0,40 y 0,59 y valores inferiores al 0,40.

En primer lugar, se analizan los resultados del coeficiente de Poisson de los valores superiores a 0,60 correspondientes a las fibras PP2 y PP6. Con respecto a estas fibras, presentan resultados del coeficiente de Poisson de 0,64 y 0,74 respectivamente. Acorde con las variaciones porcentuales, las fibras PP2 y PP6 presentan valores del 5%. Ambas fibras corresponden a una textura rugosa (con relieve) y con una alta curvatura según la Tabla 4.1.

Estos resultados indican que las fibras con mayor variación de ancho y curvatura presentan los mayores coeficientes de Poisson. Esta magnitud de estos valores obtenidos, está por encima de los valores típicos reportados (M. Jerabek *et al*, 2010). En este caso, para estos tipos de fibras, la hipótesis principal a este comportamiento es que, durante el proceso del estampado, los microfilamentos o cadenas de polímeros que componen la fibra estén desalineados, cuando la fibra se somete a tensión, estas cadenas o microfilamentos desalineados se alinean en la dirección de la tensión aplicada. Por lo tanto, la deformación transversal medida es el resultado de ambos fenómenos: la alineación corregida y la deformación transversal causada por los efectos de Poisson.

Un segundo aspecto podría ser la distribución no uniforme del coeficiente de Poisson a lo largo de las muestras con relieve. El proceso de estampado produce una distribución no uniforme del material, lo que resulta en una distribución no uniforme de la rigidez. Las regiones con mayor rigidez deben deformarse menos que las regiones con menor rigidez. Por lo tanto, es de esperar una mayor deformación transversal de las regiones de mayor relieve, ya que el material es más esbelto en esas regiones. Este comportamiento no uniforme en la deformación transversal, debe reflejarse también en la deformación longitudinal, para obtener una distribución uniforme de Poisson.

Basándose en esta hipótesis, las fibras con relieve de una determinada composición, deben tener siempre un "coeficiente de Poisson efectivo" mayor que las muestras sin relieve con la misma composición.

En segundo lugar, se analizan los resultados del coeficiente de Poisson de los valores comprendidos entre 0,40 y 0,59, correspondientes a las fibras PP4, PP1 y PP5. Con respecto a estas fibras, presentan valores intermedios correspondientes a 0,54, 0,55 y 0,56 respectivamente, con coeficientes de variación comprendidos de 7% al 13%. Estas fibras corresponden a una textura rugosa, pero con una curvatura media, presentando una reducción del coeficiente de Poisson en comparación de los valores superiores al 0,60 de un 18%. Estos resultados eran de esperarse, ya que estos tipos de fibras presentan una menor curvatura y relieve.

Finalmente, se analiza el resultado del coeficiente de Poisson del menor valor correspondiente a la fibra PP3, con un valor de 0,38. Este resultado concuerda con los valores comunes descritos en la literatura de acuerdo a las muestras de polipropileno isotrópico. Además, las medidas realizadas en este tipo de fibra son significativamente más

consistentes que las demás evaluadas, representando el menor coeficiente de variación correspondiente a 2%.

De manera general, los coeficientes de Poisson superiores al 0,5 no eran de esperarse, según los valores típicos reportados en la literatura. Los valores varían del 0,30 al 0,50 dependiendo de la composición del material, (ya sea puro o derivado de otros materiales) y las condiciones de ensayos (velocidad de carga, temperatura, etc.) (Tscharnuter et. al, 2011), siendo los valores de alrededor de 0,40 lo más comunes reportados para la fibras de polipropileno (A. M. Hartl, et. al, 2015). Los valores reportados en la presente investigación, presenta de manera general valores superiores a los de la literatura, y esto se debe a que los ensayos referenciados se realizan mediante muestras planas con dimensiones tanto longitudinal como transversal uniforme, maquinadas por placas moldeadas sin relieve superficial o relleno (M. Jerabek *et al.*, 2010).

4.3.3. Validación experimental

Con el objetivo de realizar una validación de las medidas de la deformación longitudinal del método empleado en este capítulo (DIC 2D modificado), se ha considerado comparar los resultados mediante la deformación longitudinal medida por un extensómetro externo. Debido a las limitaciones de la apertura inicial de 50 mm, el extensómetro no se ha podido fijar en las fibras evaluadas, ya que la longitud expuesta del ensayo es de sólo 1 cm. En su lugar, se han preparado fibras (del hilo madre) de 12 cm de largo, en este caso siguiendo el mismo proceso descrito en el sub apartado 4.2.3. (Metodología de la determinación del coeficiente de Poisson).

El proceso de carga se ha de grabar con las mismas especificaciones del método empleado, mediante el sistema de captura de imágenes descrito en el sub apartado 4.2.3, inciso b), y son analizadas mediante el algoritmo de procesamiento de imágenes (sub apartado 4.2.3. c).

La Figura 4.12 muestra la configuración del ensayo, con la adición del extensómetro, en este caso se ha tomado en consideración una longitud del hilo madre de 7 cm de ensayo, mientras que 2,5 cm de cada lado para la sujeción de la fibra. Del mismo modo al ensayo anterior, siempre se intenta acercar la lente lo más cerca posible a la muestra, y así maximizar el número de píxeles que cubren el ancho de la fibra en las imágenes capturadas.

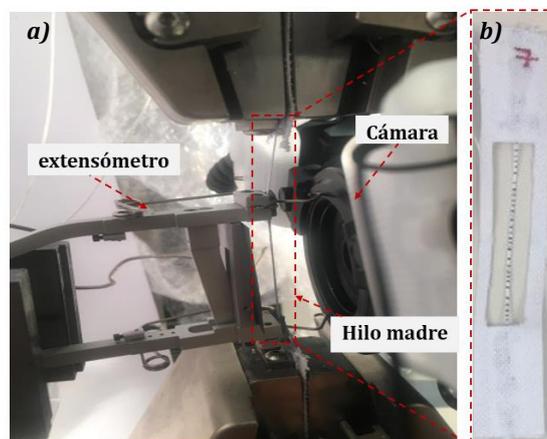


Figura 4.12 – Configuración del ensayo a). Hilo madre adherido a la malla textil b).

A continuación la Figura 4.13 presenta las curvas carga-deformación longitudinal realizadas con un extensómetro acoplado. Para esta validación experimental, se realiza el ensayo a tracción al hilo madre de la fibra PP4, tomando en cuenta cuatro réplicas.

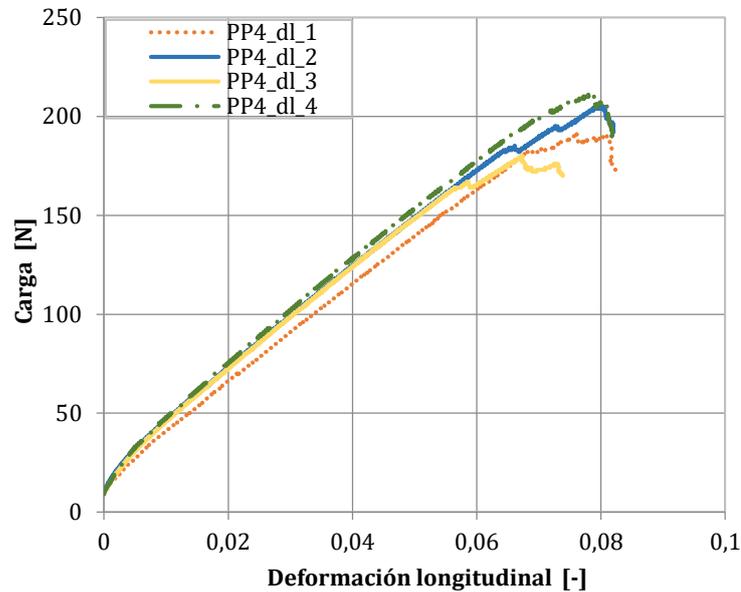


Figura 4.13 – Curva Carga – deformación longitudinal del hilo madre

Los resultados correspondientes a las muestras ensayadas, presentan cargas últimas de aproximadamente 200 N, representando un descenso de la carga en comparación a las muestras de 1 cm del 37%, esto puede deberse al factor escala del material y posibles deshilache del hilo madre que las fibras no presentaban. En cuanto a la deformación longitudinal oscilan entorno al 0,06 al 0,08.

Las deformaciones previas a la rotura se identifican en base a las caídas de pendiente en las curvas y así se comparan con las deformaciones medidas a través del algoritmo de análisis de imágenes. La Tabla 4.4 presenta los resultados de la deformación longitudinal medida a partir del extensómetro junto a las mediciones obtenidas aplicando la metodología de procesamiento de imágenes.

Tabla 4.4 – Resultados de la deformación longitudinal y error de medición

Muestra	Def. longitudinal con el extensómetro	Def. longitudinal DIC	Error [%]
PP4_dl_1	0,070	0,071	1,40
PP4_dl_2	0,065	0,063	3,10
PP4_dl_3	0,060	0,059	1,70
PP4_dl_4	0,075	0,075	0,00

En la Tabla 4.4 se puede afirmar que las mediciones basadas en el procesamiento de imágenes coinciden con las lecturas del extensómetros con un máximo valor de error de un 3,1%, donde se cataloga como un ensayo adecuado para la determinación de las deformaciones a partir del ensayo a tracción, permitiendo obtener valores representativos de los mismos.

Por otro lado, es necesario verificar el error de medición del coeficiente de Poisson. La metodología descrita en el sub apartado 4.2.3. presenta una precisión de medición de ± 1 píxel. A continuación la Tabla 4.5 convierte este valor en un error de medición del coeficiente de Poisson, que se estima en función de la deformación longitudinal previo a la rotura y del número de píxeles que cubren el ancho de la fibra.

Tabla 4.5 – Error de medida del coeficiente de Poisson

Fibra	Def. longitudinal en rotura (-)	Nº de píxeles que cubren el ancho de las fibras	Error del ± 1 píxel (-)
PP1	0,06	233	0,075
PP2	0,07	247	0,061
PP3	0,14	282	0,025
PP4	0,07	252	0,057
PP5	0,09	255	0,045
PP6	0,08	154	0,047

Los valores de error obtenidos oscilan entre 0,025 y 0,075, con un valor promedio de 0,05. Cabe destacar que, aunque la precisión de medición del coeficiente de Poisson en algunas fibras (PP1) es baja, la fiabilidad de los resultados obtenidos no se ve comprometida debido al número de réplicas ensayadas por cada tipo de fibras (6 muestras). Finalmente, estos resultados coinciden con la baja variabilidad correspondientes a los datos del coeficiente de Poisson de las fibras sintéticas evaluadas.

4.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha abordado los resultados del coeficiente de Poisson en fibras estructurales sintéticas, a partir de un método basado en la correlación de imagen digital en 2D modificado (*digital image correlation DIC*), el cual es capaz de medir movimientos longitudinales y transversales de la fibra mediante un dispositivo de captura de imagen, y así determinar las deformaciones longitudinales y transversales representadas en el coeficiente de Poisson.

En cuanto a los resultados de resistencia a tracción, se aprecian influencias en función de la fibra empleada, tanto de las características geométricas (dimensión y textura) como del material. En donde la fibra PP1 presenta la mayor carga última de 418 N, siendo este tipo de fibra de alta rugosidad y de gran sección. En general, las fibras rugosas presentaron resultados de resistencia a tracción satisfactoria, mientras que la fibra lisa (sin relieve, correspondiente a la PP3) presentó la carga última inferior de 115 N.

Los resultados del coeficiente de Poisson de los seis tipos de fibras, muestran valores comprendidos entre 0,38 y 0,74. Los valores del coeficiente de variación oscilan del 4% al 13%. Por lo general esta variabilidad es baja, lo cual indica que las mediciones son confiables, en donde las diferencias observadas entre las fibras son estadísticamente significativas.

La fibra lisa (PP3) presenta el menor coeficiente de Poisson, con un valor de 0,38. Este resultado concuerda con los valores comunes descritos en la literatura de acuerdo a las muestras de polipropileno isotrópico. Mientras que las fibras con textura rugosa y de alta

curvatura presentan mayores coeficientes de Poisson. Este aumento puede explicarse por distintos factores, pero la hipótesis principal es la distribución del material no uniforme, generado por el relieve de la muestra, lo cual provoca una alteración de las propiedades mecánicas a lo largo de la fibra.

Las deformaciones longitudinales obtenidas por el nuevo procedimiento experimental coinciden con las lecturas del extensómetro, con un máximo valor de error de un 3,1%, lo que indica que la metodología desarrollada proporciona mediciones precisas.

5. CONTROL DE CALIDAD A EDADES TEMPRANAS

5.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores, se ha demostrado la viabilidad estructural de las macrofibras estructurales, realizando un diseño de cuantías de fibras con la finalidad de optimizar al máximo el material, y por ende sus propiedades, con especial énfasis en las mecánicas. Una vez garantizada la dosificación con adecuada docilidad para su empleo en la fabricación de dovelas, se debe prestar especial atención al desempeño estructural del hormigón a tempranas edades.

Las solicitaciones críticas aplicadas en la estructura suelen ocurrir durante la fase de construcción, generalmente para la parte de la manipulación del elemento a edades tempranas. En este sentido, las dovelas pasan por diferentes etapas iniciales en su proceso constructivo, que dan lugar a distintas acciones y configuraciones de carga, en las cuales se destacan el desmolde y volteo de las dovelas que dan lugar a esfuerzos de flexión, además el acopio de las dovelas en los parques de almacenamiento, que de igual manera producen esfuerzos de flexión, donde se pueden catalogar como pequeñas acciones de carga si las excentricidades de los apoyos también lo son. Asimismo, en esta situación puede aparecer tensiones debido a los gradientes térmicos.

En este sentido, el estudio de la caracterización mecánica tanto a edades tempranas como a los 28 días es de gran interés. El control de obra se realiza habitualmente a los 28 días del curado del hormigón, pero ha de reflejar necesariamente el comportamiento a edades tempranas del hormigón. De hecho, los principales requerimientos mecánicos de las dovelas tienen lugar a corta edad, Particularmente, en términos de diseño la edad del hormigón durante las etapas de transición (desmolde, almacenamiento, transporte) debe ser lo suficientemente avanzada como para asegurar que los esfuerzos de tracción sean menores que la resistencia a flexión del material.

5.1.1. Objetivos

El presente capítulo pretende mostrar la influencia de las edades tempranas en el HRF, a través de la evaluación de sus propiedades mecánicas. En base a esto se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar y comparar los resultados de la campaña experimental realizada sobre probetas curadas mediante el ensayo acelerado y las probetas ensayadas mediante el ensayo convencional.
- Obtener una correlación entre el ensayo Barcelona y el ensayo a flexotracción (tanto para los resultados en probetas de curado estándar como curado acelerado).
- Verificar mediante distintos requerimientos exigidos de proyectos actuales, si el método y la dosificación empleada puede ser válido para Dovelas.

5.1.2. Organización del estudio

Inicialmente, en el *apartado 5.2* se describe de forma detallada la campaña experimental realizada. Llegados a este punto, en el *apartado 5.3* se aborda el análisis de los resultados anteriormente obtenidos y se verifican las diferencias entre los ensayos a 28 días y los ensayos a corta edad. Los resultados se organizan presentando primero la caracterización del HRF de las propiedades físicas y mecánicas, teniendo en consideración el comportamiento postfisuración del material. A partir de los resultados presentados de la campaña experimental, en el *apartado 5.4* se obtiene una correlación entre el ensayo Barcelona y el ensayo de la norma UNE-EN-14651. Finalmente, en el *apartado 5.5* se presenta la verificación de que el ensayo pueda ser empleado para el fin planteado, a partir de la validación de los resultados obtenidos con requerimientos exigidos en túneles de distinta índole.

5.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

A continuación, se presentan los detalles principales de la campaña experimental realizada con la finalidad de determinar el comportamiento mecánico de hormigón reforzado con fibras plásticas solicitado a edades tempranas. A tal efecto, se describe en este apartado la dosificación y materiales utilizados para la fabricación, el proceso de producción, el método de curado acelerado empleado para 7 horas, donde se eleva la temperatura ambiente y se aumenta la humedad para favorecer un rápido curado en el que

el hormigón gane resistencia de forma acelerada. Finalmente, se presenta el método de caracterización del HRF donde se ha de analizar los ensayos mecánicos tanto del hormigón a 7 horas (curado acelerado) como a 28 días de curado (curado convencional).

5.2.1. Dosificaciones y materiales

Durante la presente campaña experimental, se ha empleado un hormigón de alta resistencia (AR), reforzado con fibras derivada de la poliolefina (PP4), siendo este tipo de fibra con mejores prestaciones presentados en el *Capítulo 3*. En la Tabla 5.1 se define la dosificación utilizada en esta campaña experimental. El árido grueso empleado en la presente dosificación es un árido granítico, mientras que los áridos finos están conformado de una mezcla de arena caliza y sílicea. En la tabla se observa una relación agua/aglomerante es igual a 0,4 y un contenido de aditivo igual a un 1% del total del cemento suministrado.

Tabla 5.1 – Dosificación del hormigón empleado

Componente	Kg/m ³
Arena 0/4 sílicea	344
Arena 0/4 caliza	670
Árido 4/12	161
Árido 12/20	660
Agua	160
CEM I/42,5 R	400
MasterGlenium 1425	3,20
Relación a/c	0,4

El hormigón empleado ha sido diferente al del *Capítulo 3*, ya que los áridos y cemento con los que se han contado son distintos. Para no añadir variables en el estudio, se ha considerado un único contenido de macrofibras plásticas de 10 kg/m³. A pesar de los beneficios que la adición de fibras concede al hormigón en estado endurecido, estas mismas alteran la consistencia en estado fresco, disminuyendo su trabajabilidad.

El código empleado para referenciar la amasada de hormigón, es exactamente la misma empleada del *Capítulo 3* en donde: “AR” corresponde al hormigón de alta resistencia, a estas dos letras le sigue la cifra “10” la cual referencia el contenido de fibra en kg/m³. Por último, se incluye el tipo de fibra “PP4” donde quedaría cifrado con el código {AR_10_PP4}.

5.2.2. Proceso de producción

La fabricación del hormigón empleado en esta campaña experimental se ha realizado durante el día 16 de enero del 2019 en los laboratorios de la Empresa Dragados, situada en Valdemoro, Madrid.

Para la fabricación del hormigón se ha empleado una amasadora de eje vertical de 40 litros de capacidad máxima. Debido a la capacidad máxima de la amasadora, se ha optado por realizar cinco amasadas, con la finalidad de disponer del volumen de hormigón requerido.

El amasado de la dosificación a emplear, sigue el mismo orden del proceso de amasado del *Capítulo 3*, Primeramente, los áridos gruesos junto a los áridos finos se han introducido en la amasadora y se ha de mezclar por 30 segundos, posteriormente se ha introducido el cemento y se ha de mezclado por 30 segundos. Luego las fibras se adicionan en seco y se han de mezclar durante 4 minutos. Sin detener la amasadora se añade el agua de amasado, reservando 1 litro de agua para agregar conjuntamente con los aditivos.

Tras mezclar durante aproximadamente 1 minuto, se añade el MasterGlenium 1425 con el resto del agua, dejando mezclar durante aproximadamente 4 minutos. Una vez terminado ese período se realiza una inspección visual para determinar si el AR presenta la trabajabilidad deseada, añadiendo cierta cantidad de agua si es necesario.

5.2.3. Preparación de las probetas a edades tempranas

Una vez finalizado el moldeo y compactación de las probetas, las amasadas correspondientes a ensayos de 28 días, son llevadas a un curado de cámara húmeda convencional, mientras que las probetas destinadas a ensayar a las primeras 7 horas, optan por un curado de forma acelerado. La Figura 5.1 presenta las diferentes etapas de la preparación del curado acelerado. Los pasos de este curado, tras la fabricación de las probetas se presentan a continuación:

- Una vez fabricadas las probetas se mantienen a 30 minutos a la temperatura ambiente del laboratorio.
- A continuación, se introducen en el baño de agua a 25°C y se dejan 30 minutos (Figura 5.1a).
- Se incrementa la temperatura del baño paulatinamente hasta 55°C en un plazo de 30 minutos.
- Se mantiene la temperatura del baño a 55°C durante 5 horas.
- Se desciende hasta 35°C la temperatura y se mantienen dentro 30 minutos.
- Se extraen las probetas y a partir de este momento están listas para desencofrar y ensayar (Figura 5.1b).



Figura 5.1 – Diferentes etapas de la preparación del curado acelerado

5.2.4. Métodos de caracterización del HRF

A lo largo del presente sub-apartado se describen los diferentes métodos empleados para caracterizar el hormigón, tanto a edades tempranas (curado acelerado a 7 horas), como en curado estándar (curado convencional a 28 días). La Tabla 5.2 detalla la planificación de ensayos a cada edad, a tal efecto se moldearon un total de 28 probetas: 18 cúbicas y 9 prismáticas.

Los ensayos propuestos para la caracterización del HRF a edades tempranas (7 horas) como en estado endurecido convencional (28 días) son los siguientes:

- Determinación de la densidad del hormigón (UNE-EN 83980:2014);
- Rotura a compresión simple en probeta cúbica 15x15 cm a la edad de 7 horas y 28 días según (UNE-EN 12390-3:2009);
- Ensayo o método Barcelona en probeta cúbica 15x15 cm a la edad de 7 horas y 28 días según (UNE-EN 83515:2010);
- Rotura a flexión de probetas prismáticas de 15x15x60 cm a la edad de 28 días según (UNE-EN 14651:2007).

Tabla 5.2 – Preparación de ensayos previstos

Número de probetas	Edad de ensayo	Ensayo
2 cúbicas 15x15 cm	7 horas	Resistencia a compresión
4 cúbicas 15x15 cm		Ensayo Barcelona
3 cúbicas 15x15 cm	28 días	Resistencia a compresión
10 cúbicas 15x15 cm		Ensayo Barcelona
9 prismáticas 15x15x60 cm		Resistencia residual a flexotracción

5.3. VERIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

En este apartado se pretende analizar inicialmente los resultados de la densidad y resistencia a compresión tanto para 7 horas como para el curado a 28 días. Además, se ha estudiado el comportamiento postfisuración correspondiente al ensayo a flexotracción mediante al curado estándar y finalmente el ensayo Barcelona, que en este caso se realiza el estudio de los resultados del curado estándar y del acelerado.

5.3.1. Densidad y Resistencia a compresión

En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de la densidad obtenidos de las probetas moldeadas tanto cúbicas como prismáticas. Para la determinación de la densidad en probetas cúbicas se realizaron trece muestras mientras en las probetas prismáticas nueve muestras.

Tabla 5.3 – Resultados de la densidad

Tipo de probeta empleada	Densidad [kg/m ³]	Desv. Est. [kg/m ³]	C.V. [%]
Cúbicas 15x15 cm	2381	19,92	0,84
Prismáticas 15x15x60 cm	2400	40,93	1,71

Tanto las probetas cúbicas como las prismáticas presentan densidades comprendidas entre 2381-2400 kg/m³. Las densidades aparentes en ambas medidas presentan valores similares a las de un hormigón de altas prestaciones vibrado, catalogándolo como un hormigón que cumple buenas prestaciones.

La Tabla 5.4 presenta el valor medio, desviación estándar y el coeficiente de variación de la resistencia a compresión a 7 horas (ensayo acelerado) y a 28 días del hormigón de alta resistencia. Para la determinación de la resistencia a compresión se han realizado 2 muestras por edad.

Tabla 5.4 – Valores de resistencia a compresión a 7 horas y 28 días

Edad	Promedio [MPa]	Desv. Est. [MPa]	C.V. [%]
7 horas	28,22	0,63	2,23
28 días	59,5	1,73	2,91

Con lo que respecta a la amasada del hormigón a edad de 7 horas, presenta un valor medio de 28,22 MPa con un coeficiente de variación inferior al 3%, mientras que el resultado a la edad de 28 días presenta un valor medio de 59,5 MPa e igualmente este valor medio muestra un coeficiente de variación inferior al 3%.

En comparación a la resistencia a compresión mediante el curado acelerado presenta una diferencia porcentual de un 111%. Esto quiere decir, que mediante a nuestro método de maduración del hormigón, similar al método empleado en Dovelas, a las primeras 7 horas obtenemos el 47% de la resistencia a compresión en comparación a los 28 días de curado.

Aunque la adición de las fibras en el hormigón no influye en manera directa a la resistencia a compresión, sí que el *Capítulo 3* ha mostrado que para la edad de 28 días se aprecian variaciones en la resistencia a la compresión. Esta variación se explica por la influencia que tiene la adición de altos contenidos de fibras, lo cuales crean porosidad en el material creando poros en el esqueleto granular.

Un análisis más completo con resultados de la caracterización a compresión (f_{cm}) a edades tempranas (7 horas y 2 días) como a 28 días de curado, de cuatro hormigones de alta resistencia reforzados con distintos tipos de fibras no metálicas puede encontrarse en el *Apéndice B*. Los resultados de resistencia a compresión presentan comportamientos disímiles en función del tipo de fibra. Estas variaciones ponen de manifiesto la influencia de las fibras en la trabajabilidad del material, y, por ende, en su desempeño mecánica posterior, tanto a edades tempranas como a 28 días de curado.

5.3.2. Comportamiento residual a flexotracción

La Figura 5.2 presenta los resultados obtenidos tras los 28 días de curado el comportamiento residual a flexotracción. Los resultados se presentan en términos de resistencia residual medias frente al CMOD. Tal y como muestra la Figura 5.2, e igual a los capítulos anteriores, presenta un comportamiento similar en la parte elástica, mientras que en el momento de aparición de la fisura en el hormigón, se activa el mecanismo resistente de las fibras y se producen importantes diferencias en la resistencia postfisuración del material.

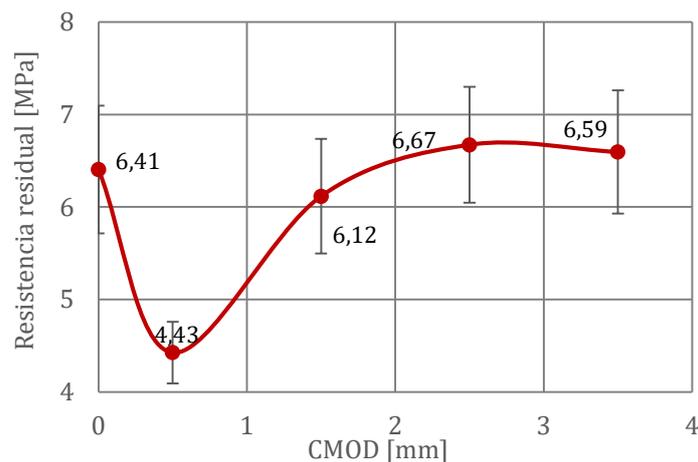


Figura 5.2 –Curva promedio y desviación estándar de la resistencia residual-CMOD del hormigón alta resistencia

El ensayo de flexotracción ha permitido evaluar la capacidad resistente del hormigón tras la aparición de la primera fisura. En el momento de aparición de la fisura en el hormigón se activa el mecanismo resistente de las fibras empleadas, produciendo importantes comportamientos en la resistencia postfisuración del material. En primer lugar, la resistencia a fisuración promedio alcanza los 6,41 MPa, valor el cual la resistencia residual sufre una ligera caída; Este descenso corresponde al 46% respecto a la resistencia pico, produciéndose un nuevo aumento de la resistencia residual superando a la obtenida de fisuración.

Un mayor detalle del comportamiento a flexión de las dosificaciones estudiadas puede encontrarse en la Tabla 5.5 en la que se presenta el valor medio a los 28 días del límite de proporcionalidad (f_L) y de las resistencias residuales a flexotracción especificadas en la norma EN 14651 (2005) ($f_{R,1}$; $f_{R,2}$; $f_{R,3}$; $f_{R,4}$).

De manera general, se observa que tras alcanzar la resistencia máxima promedio del ensayo (f_{LOP}), la resistencia postfisuración cae hasta el valor mínimo correspondiente a 4,43 MPa (f_{R1}). No obstante, a medida que el CMOD aumenta, la resistencia residual aumenta de una manera significativa en donde a los 3,5 mm se obtuvo una resistencia promedio de 6,54 MPa, lo que supone un aumento del 49% respecto al f_{R1} .

Tabla 5.5 – Resultados a flexotracción tras los 28 días de curado.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Promedio [MPa]	Desv. Est. [MPa]	C.V. [%]
f_{LOP} [MPa]	6,79	7,13	6,22	7,51	6,51	5,34	5,68	6,51	5,96	6,41	0,69	10,77
f_{R1} [MPa]	4,23	4,7	4,37	4,76	4,3	4,75	3,76	4,28	4,69	4,43	0,33	7,52
f_{R2} [MPa]	5,89	6,48	5,72	6,5	5,75	6,92	4,95	6,08	6,77	6,12	0,62	10,12
f_{R3} [MPa]	6,59	7,08	6,07	7,44	6,4	7,54	5,58	6,64	6,71	6,67	0,63	9,39
f_{R4} [MPa]	6,77	7,01	6,09	7,26	6,31	7,7	5,54	6,12	6,54	6,59	0,67	10,1

Nuevamente cabe señalar que, según la literatura técnica (Carmona *et al.*, 2009; Parmentier *et al.*, 2008), los resultados a flexotracción presenten una alta dispersión situándose por el 20% de coeficiente de variación. La dispersión de los resultados se muestra en la Tabla 5.5, en ella aparece la dispersión según el ancho de fisura, en donde los valores de F_{lop} presentan las dispersiones más desfavorables a la investigación de un 11%, siendo valores conservadores y favorables.

5.3.3. Comportamiento residual en el ensayo Barcelona

La Figura 5.3 presenta los resultados obtenidos del comportamiento residual en el ensayo Barcelona, correspondientes al método de curado acelerado (7 horas). Los resultados se presentan en términos de resistencia residual medias frente al desplazamiento axial del pistón.

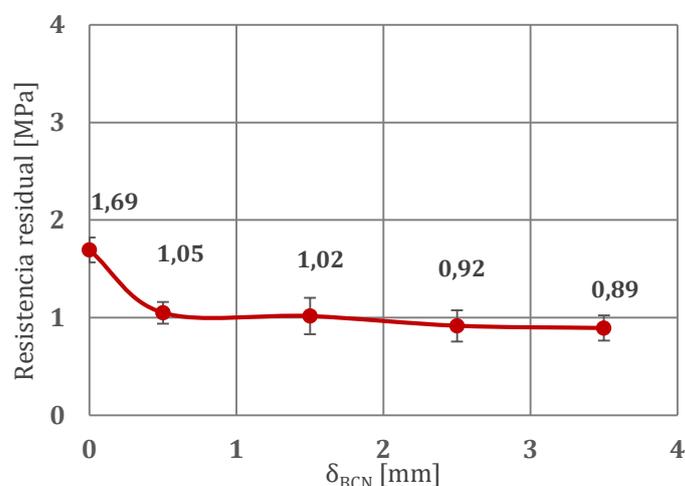


Figura 5.3 – Curva promedio y desviación estándar de la resistencia residual-desplazamiento axial a 7 horas

Tal y como muestra la Figura 5.3, la resistencia pico presenta un promedio de 1,69 MPa. Se puede notar que la resistencia postfisuración máxima se obtiene para un desplazamiento de pistón de 0,5 mm, y a partir de la misma, decrece de manera moderada y paulatina, a mayor desplazamiento de pistón.

Se presenta a continuación los resultados obtenidos en el ensayo Barcelona a la edad de 7 horas tras el curado acelerado. La Tabla 5.6 resume las resistencias residuales obtenidas experimentalmente, conjuntamente con la desviación estándar y el coeficiente de

variación a partir de 4 muestras. Los valores mostrados corresponden a un desplazamiento de pistón de 0.5, 1.5, 2.5, y 3.5 mm a partir del punto de fisuración de cada ensayo.

Tabla 5.6 – Resultados del ensayo Barcelona tras 7 horas de curado acelerado

	1	2	3	4	Promedio [MPa]	Desv. Est [MPa]	C.V. [%]
f_{ct} [MPa]	1,72	1,51	1,74	1,80	1,69	0,13	7,54
$f_{0.5}$ [MPa]	0,92	1	1,18	1,10	1,05	0,11	10,71
$f_{1.5}$ [MPa]	0,83	0,91	1,24	1,09	1,02	0,19	18,25
$f_{2.5}$ [MPa]	0,74	0,83	1,09	1,00	0,92	0,16	17,43
$f_{3.5}$ [MPa]	0,74	0,83	1,01	0,99	0,89	0,13	14,52

Tal y como se puede apreciar, el coeficiente de variación del ensayo se sitúa en valores menor al 18%, valor que es considerablemente menor a los alcanzados con otras metodologías experimentales (Molins *et al.*, 2009). En cuanto al valor del f_{ct} presenta un valor promedio de 1,89 MPa y al llegar a la etapa de transición presenta un descenso de la resistencia del 60%. Una vez llegados a la rama residual, para un desplazamiento de 1,5 mm muestra una resistencia de 1.02 MPa, y al llegar a los 3,5 mm de desplazamiento sufre una caída del 15%.

La Figura 5.4 presenta los resultados obtenidos tras el comportamiento residual en el ensayo Barcelona correspondientes al método convencional (28 días).

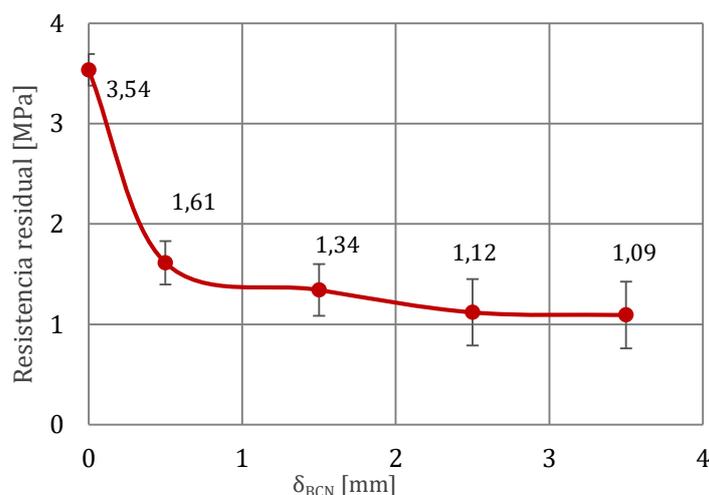


Figura 5.4 – Curva promedio y desviación estándar de la resistencia residual-desplazamiento axial a 28 días

La Figura 5.4 muestra la curva promedio de la resistencia residual a 28 días de durado, en donde la resistencia pico presenta un promedio de 3,54 MPa. Igual que para los valores a 7 horas de curado, se observa que la resistencia postfisuración máxima se obtiene para un desplazamiento de pistón de 0,5 mm, y a partir de la misma, a mayor desplazamiento de pistón se ve reflejado un decrecimiento de la resistencia.

Un mayor detalle en el análisis puede observarse en la Tabla 5.7. En ella se resumen las resistencias residuales obtenidos en el ensayo Barcelona a la edad de 28 días tras el curado convencional. Se presentan los resultados de las 10 muestras, junto con el valor

promedio medidas experimentales, además los resultados de la desviación estándar y el coeficiente de variación. Los valores mostrados corresponden a un desplazamiento de pistón de 0.5, 1.5, 2.5, y 3.5 mm a partir del punto de fisuración de cada ensayo.

Tabla 5.7 – Resultados del ensayo Barcelona tras 28 días de curado

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio [MPa]	Desv.Est. [MPa]	C.V. [%]
<i>fct</i> [MPa]	3,41	3,63	3,7	3,61	3,61	3,56	3,24	3,74	3,51	3,35	3,54	0,16	4,47
<i>f0.5</i> [MPa]	1,62	1,35	1,87	1,44	1,46	1,93	1,69	1,34	1,85	1,59	1,61	0,22	13,38
<i>f1.5</i> [MPa]	1,57	1,13	1,27	1,28	1	1,81	1,51	1,21	1,57	1,09	1,34	0,26	19,24
<i>f2.5</i> [MPa]	1,55	0,97	0,89	1,07	0,73	1,7	1,24	1,1	1,28	0,68	1,12	0,33	29,58
<i>f3.5</i> [MPa]	1,55	0,97	0,73	1,05	0,72	1,7	1,25	1,1	1,2	0,68	1,09	0,33	29,12

Tal y como se puede apreciar, el coeficiente de variación del ensayo se sitúa, de forma general, en valores próximos a los obtenidos con el ensayo Barcelona (30%). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la población utilizada para obtener los valores medios corresponde a diez probetas.

En general, se observa que la resistencia posfisuración máxima se obtiene para un desplazamiento axial de 0,5 mm correspondiente a 1,61 MPa; a partir de ahí, la caída de la gráfica ha sido moderada, al llegar al desplazamiento de 3,5 mm presenta un descenso de 41%.

En base a estos resultados se puede evaluar la variación de las resistencias residuales de los resultados del comportamiento residual en el ensayo Barcelona entre los métodos de curado estudiados. En lo que se refiere a la resistencia pico del material a 28 días de curado convencional presenta un aumento de la resistencia de un 109%. Es evidente apreciar una variación en esta fase la cual alcanza la resistencia a tracción del material, y es donde solo trabaja la matriz de hormigón sin la contribución de las fibras.

En cuanto a la fase residual, en ambos resultados se aprecia la tendencia que, a mayor desplazamiento axial tras la fisuración del material mayor descenso de la resistencia. Para todos los desplazamientos axial de pistón correspondientes al curado convencional (28 días) presentan mayores resistencias residuales en comparación al método acelerado. Una vez finaliza la etapa de transición (para un desplazamiento de pistón de 0,5 mm) el curado convencional presenta un aumento de la resistencia de un 53% con respecto al curado acelerado.

Una vez inicia la fase o rama residual de ambos resultados, se aprecia una variación porcentual menos significativa, para desplazamientos de 1,5; 2,5 y 3,5 mm de desplazamiento del pistón, el curado convencional presenta un aumento de la resistencia de un 31%, 19% y 22% respectivamente con respecto al curado acelerado.

A pesar de presenciar diferencias en cuanto a las resistencias residuales según el método de curado, se observa que la madurez del hormigón influye de manera distinta en función de cada fase del ensayo. Nótese como la madurez del hormigón influye en la resistencia de manera significativa en la fase elástica-lineal del material y la fase de transición, obteniendo variaciones porcentuales mayor al 50%. Por otro lado, los resultados obtenidos en términos de resistencia residual no presentan variaciones porcentuales

significativas, lo que permite determinar que el material mediante al método de maduración acelerado es capaz de trabajar la adherencia fibra-matriz de manera satisfactoria.

5.4. CORRELACIÓN ENTRE ENSAYOS

En este apartado, se realiza una regresión lineal entre los distintos parámetros del ensayo Barcelona (UNE-EN 83515:2010) y el ensayo a Flexotracción (UNE-EN 14651), mediante el procedimiento descrito por (Galeote *et al.*, 2017).

Además de determinar los parámetros que proporcionen la correlación correcta, es necesario determinar si la correlación es viable para el tipo de hormigón y fibra empleada. En nuestro caso, el estudio se realizará con la dosificación empleada en el este capítulo (apartado 5.2.1).

Para determinar la correlación ensayos, se compara la fuerza obtenida para un valor dado de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm de CMOD en el ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651). Estos valores se comparan con la fuerza y energía obtenidos para el mismo desplazamiento de pistón en el ensayo Barcelona. Los códigos empleados para referenciar cada parámetro de interés se presentan a continuación: “ $F_{BCN,i}$ ” para las fuerzas y “ $E_{BCN,i}$ ” para los valores de energías, como se presenta en la Ecuación 5-1.

De esta manera, la correlación implica obtener los parámetros a y b de la ecuación mostrada a continuación. Para cada tipo de valor de CMOD, es necesario determinar dichos parámetros, en este caso están representados por el subíndice i . Cabe destacar que cada CMOD utilizado en el ensayo a flexotracción es correspondiente al desplazamiento axial correspondiente al ensayo Barcelona.

$$F_{UNE-EN\ 14651,i} = a \cdot F_{BCN,i} + b \cdot E_{BCN,i}^2 \quad [5-1]$$

Se ha realizado un análisis detallado para identificar la ecuación que proporciona las correlaciones correctas entre el ensayo BCN y UNE-EN 14651. El resultado de la ecuación debería ser el parámetro del ensayo UNE-EN 14651, en donde contiene los parámetros de los resultados del ensayo BCN, tal y como presenta la Ecuación 5-1.

5.4.1. Parámetros obtenidos de la correlación

Para la obtención de los parámetros a y b presentados de la Ecuación 5-1, se obtienen a partir de los ajustes obtenidos de los ensayos de la campaña experimental descrita en el sub-apartado 5.3, correspondientes a los resultados de las probetas ensayadas a los 28 días de curado. Para realizar una correcta interacción se han de tomar los resultados de la carga y energía del ensayo Barcelona junto con la carga del ensayo a Flexotracción; tomando en cuenta los resultados para cada valor de la i .

El ajuste de los parámetros a y b se realiza empleado el programa en Matlab, con un algoritmo Levenger-Marquardt para el ajuste no lineal. Los diferentes valores obtenidos del ajuste experimental de los datos de la campaña experimental se muestran a continuación:

Tabla 5.8 – Parámetros del ajuste para los diferentes valores del CMOD

CMOD [mm]	AR_10_PP4	
	a	b
0,5	0,308505	-0,005543
1,5	0,383293	-0,000475
2,5	0,427002	-0,00013
3,5	0,115737	0,000236

5.4.2. Análisis de los resultados del curado convencional (28 días)

La Figura 5.5 presenta la gráfica comparativa entre los valores medios de la resistencia residual a flexotracción (UNE-EN 14651), para cada valor de CMOD (0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm), frente a los valores obtenidos a partir de la correlación de la Ecuación 5-1, obtenida a partir de los datos del ensayo Barcelona. Además, se presenta los intervalos de confianza para cada CMOD.

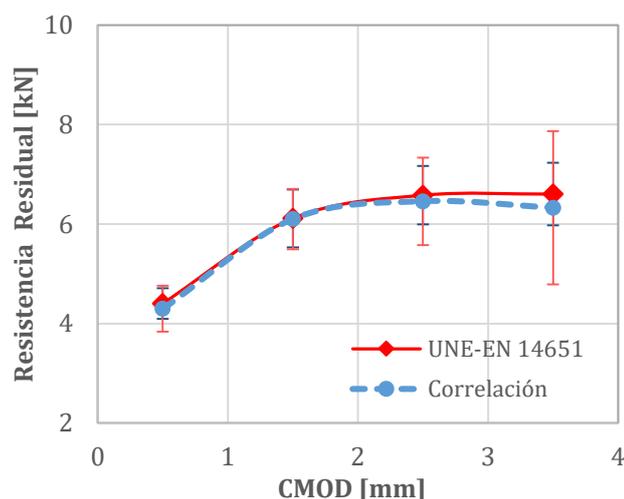


Figura 5.5 – Curva real y correlación de UNE-EN 14651 con intervalos de confianza a 28 días de curado

Tal y como se muestra en la Figura 5.5, se observa que para cada CMOD, la mayor resistencia residual presentan los resultados promedios obtenidos mediante el ensayo a flexotracción (UNE-EN 14651), frente a las estimaciones de resistencias residuales calculadas (correlación) mediante el ensayo Barcelona. Para la curva correspondiente al UNE-EN 14651 se aprecia un aumento de la resistencia a mayor ancho de fisura, mientras que la curva correspondiente a la correlación, se aprecia un aumento de la resistencia hasta llegar a los 2,5 mm de CMOD, y luego presenta un descenso de aproximadamente del 2,3%.

En segundo lugar, se afirma que la correlación proporciona valores medios de resistencias residuales muy similares a los resultados del ensayo a UNE-EN 14651; Siendo los datos de la correlación inferiores a los resultados de la campaña experimental. Dicho resultado indica que el ajuste obtenido con la correlación empleada es considerada satisfactoria para este tipo de hormigón (dosificación y contenido de fibra).

La Figura 5.6 presenta la comparación entre los valores de las resistencias residuales i de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm. El eje de abscisas representa los valores de resistencia residual mediante la correlación entre ensayos a partir de la Ecuación 5-1 y en el eje de ordenadas los valores correspondientes a los datos experimentales del ensayo UNE-EN 14651.

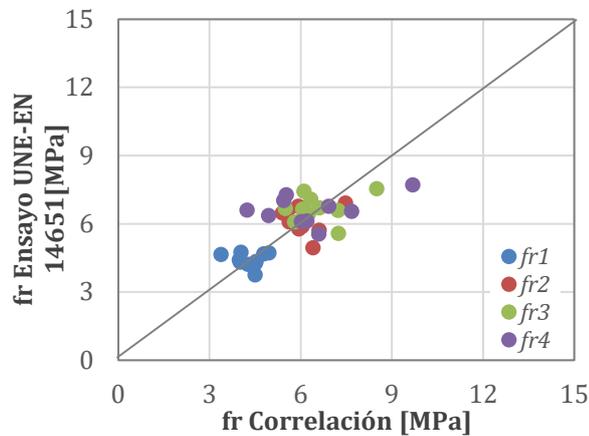


Figura 5.6 – Comparación entre la resistencia medida en el UNE-EN 14651 y la resistencia estimada a partir de los resultados BCN con la correlación a 28 días de curado

En la Figura 5.6 se observa que los puntos se distribuyen de forma aproximada y simétrica respecto a la recta identidad. Se aprecia que para i de 3,5 mm algunos puntos aleatorios se muestran más dispersos, siendo estos resultados los que presentan mayor dispersión (Figura 5.5). Por lo general, los resultados acreditan que los valores promedios de resistencias residuales obtenidos al correlacionarlos presentan valores muy similares a los expuestos experimentalmente a partir del ensayo a flexotracción.

5.4.3. Análisis de los resultados del curado acelerado (7 horas)

La Figura 5.7 presenta la gráfica comparativa entre los valores medios de la resistencia residual a flexotracción a 28 días de curado, para cada valor de CMOD (0,5; 1,5 y 2,5 mm), frente a los valores obtenidos a partir de la correlación de la ecuación [5-1], la cual se ha considerado como una posible estimación de los resultados. En este caso los resultados son referentes al ensayo Barcelona a partir del curado acelerado.

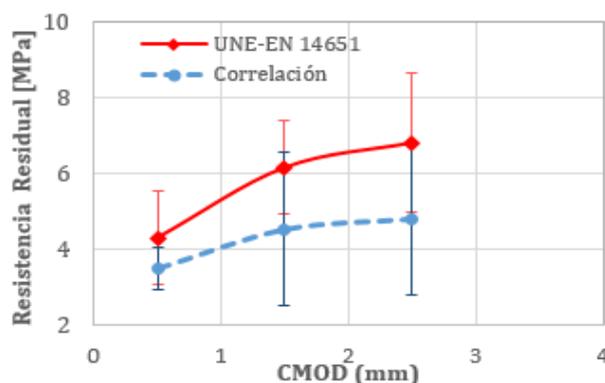


Figura 5.7 – Curva real y correlación de UNE-EN 14651 con intervalos de confianza a 7 horas de curado

A pesar que los parámetros a y b se han obtenido mediante los resultados del curado estándar (28 días), al ser la misma dosificación empleada en ambos tipos de curado, para el análisis de los resultados del ensayo acelerado se han empleado los mismos parámetros proporcionados en la Tabla 5.8. Al igual que los resultados correspondientes al curado convencional, los resultados del curado acelerado (Figura 5.8) muestra una buena estimación de la correlación a los valores reales (UNE-EN 14651), siendo la curva de la correlación inferior al del valor real.

Para ambos casos se aprecia un aumento de la resistencia a mayor CMOD, teniendo en cuenta que no se ha podido correlacionar los resultados a un desplazamiento de 3,5 mm debido a que en algunos casos el ensayo ha sido detenido antes de llegar a los 4 mm de desplazamiento del pistón, y por consiguiente al no tener un mínimo de réplicas, no se ha podido determinar dicha correlación. Para cada CMOD de 0,5; 1,5 y 2,5 mm la curva UNE-EN 14651 presenta una variación porcentual superior con respecto a la correlación de 7,8%, 38% y 40% respectivamente.

De manera análoga a la correlación correspondiente al curado estándar, nuevamente se confirma que la estimación mediante a los resultados del curado acelerado proporciona valores de resistencias residuales similares a los resultados del UNE-EN 14652; siendo los datos de la correlación inferior a los datos de la campaña experimental. La reducción de resistencia residual por parte de la estimación a edades tempranas era de esperarse debido a la pérdida de resistencia a la adherencia. El hormigón debe presentar una cierta madurez para que las fibras puedan proporcionar una adherencia necesaria a la matriz y así evitar arrancamientos con demasiada facilidad.

El resultado mediante el ensayo acelerado no proporciona resultados prácticamente idénticos como el caso anterior, aunque si se puede calificar como una estimación satisfactoria. Esta variación entre ambos resultados puede deberse a varios factores, como el número de réplicas en el ensayo, que en este caso solamente se han ensayado 4 muestras, otro factor importante ha de ser la adherencia de las fibras con la matriz del hormigón, explicado anteriormente, donde el curado estándar presenta una mayor adherencia fibra-matriz por el tiempo de maduración. Finalmente, otro factor que puede repercutir de una manera mínima la resistencia del hormigón y/o el lote empleado para esta dosificación, la cual puede variar en el contenido y orientación de la fibra. Estas variaciones porcentuales figuran aproximadamente un 30%.

La Figura 5.8 presenta la comparación entre los valores de las resistencias residuales (0,5; 1,5 y 2,5 mm), correspondientes a los datos experimentales del UNE-EN 14652 y los datos obtenidos mediante la correlación entre los ensayos.

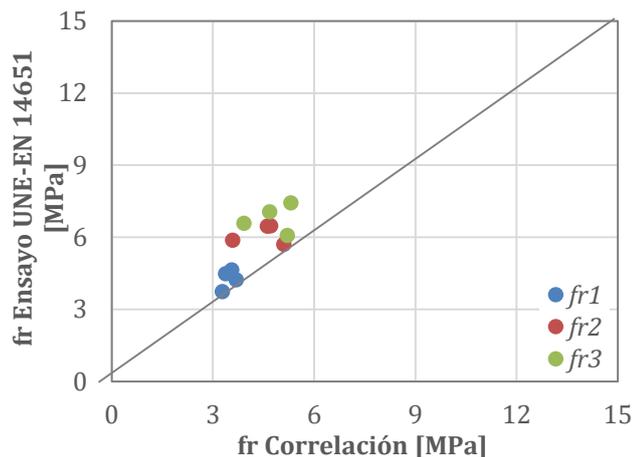


Figura 5.8 – Comparación entre la resistencia medida en el UNE-EN 14651 y la resistencia estimada a partir de los resultados BCN con la correlación a 7 horas de curado

La Figura 5.8 muestra para la amasada mediante el curado acelerado, la comparativa entre los valores de las resistencias residuales (exceptuando los resultados de fr4) tanto los experimentales mediante el ensayo UNE-EN 14651 (muestras a 28 días de curado) y los datos obtenidos mediante la correlación entre ensayos (Ensayo Barcelona mediante el método de curado acelerado).

En la presente comparativa puede observarse que sus puntos se distribuyen de forma aproximada respecto a la recta de identidad, pero no se aprecia la simetría que se observa en la Figura 5.8. Ello puede deberse al contenido de réplicas en este ensayo, para este caso solamente se han utilizado cuatro réplicas, mientras que para el curado convencional se han ensayado más de diez probetas.

Puede concluirse por tanto que la comparación obtenida permite estimar con ciertas limitantes la correlación entre el ensayo Barcelona y el ensayo de la norma UNE EN-14651. Para acercarnos a una correlación más precisa, se sugiere ensayar un número mayor a 10 réplicas por ensayo.

5.5. VALIDACIÓN DEL MÉTODO MEDIANTE PROYECTOS PREVIOS

En base a lo desarrollado en este capítulo el cual describe el control de calidad a edades tempranas, surge la necesidad de validar los resultados obtenidos tanto a corta edad como a los 28 días de curado convencional mediante a requerimientos estructurales en túneles de distinta índole.

Una vez las dovelas prefabricadas abandonan el túnel de curado (curado acelerado), el fabricante debe de realizar un control de calidad mediante a probetas, para determinar si la resistencia de diseño es alcanzada para cada una de ellas. Esta información es relevante para rechazar o aceptar las dovelas al inicio de su fabricación y así afinar el proceso de curado. Si la medida de la resistencia a la compresión alcanza el valor mínimo estipulado por el diseñador, se acepta la dovela y se elimina el encofrado.

Por consecuencia, el tiempo es uno de los parámetros relevantes a tener en cuenta cuando se utiliza este método de curado acelerado, teniendo en consideración que, a mayor período de curado acelerado, mayor resistencia a compresión (Mehta, P. K., & Monteiro, 2006), asimismo, para desencofrar es importante establecer resistencias a flexotracción según el proyecto y la normativa a cumplir.

La Tabla 5.9 presenta datos en experiencias internacionales de dovelas existentes y en construcción. Funciones como túneles ferroviarios (TF), de metro (TM) y de almacenamiento de aguas residuales (CSST), se han empleado para la ejecución de las dovelas.

En cuanto a la geometría de los anillos presentan valores de esbeltez (D_i/e) no superior a 21, indicando que los valores bajos de esbeltez representan mayor rigidez del material y a la vez menor sensibilidad a posibles flexiones derivadas de discontinuidades del terreno, y, por tanto, la sección transversal de la dovela tiende a estar comprimida en régimen de servicio. Por el contrario, cuanto mayor es la esbeltez, mayor es la deformidad del anillo y mayor probabilidad de producirse flexiones elevadas concomitantes con el esfuerzo axil de régimen permanente. (de la Fuente *et al.*, 2014).

A partir de los datos presentados en la Tabla 5.9, se observan las distintas características exigidas en dovelas prefabricadas en túneles, entre ellas se presenta el Metro de Doha en Qatar, el Metro North West Rail Link (NWRL) en Sydney, Australia, el Túnel ferroviario Crossrail C-305 en Londres y finalmente el Combined Sewage Storage Tunnel (CSST) en Ottawa, Canadá

En el caso de las resistencias mínimas exigidas a edades tempranas del hormigón, se observan resistencias características a compresión por desmolde no menor de 12 N/mm², siendo 20 N/mm² el valor esperado para el tipo de hormigón utilizado en esta investigación. En cuanto al resultado de resistencia a compresión mediante el método de curado acelerado empleado, cumple con las exigencias mínimas de diseño presentando un valor medio de 28,2 N/mm².

En cuanto a los valores del límite de proporcionalidad (f_{LOP}) exigidas por los proyectos mostrados en la tabla anterior, varían de 4,2 a 5 MPa. Los resultados promedios de la campaña experimental realizada, cumple las exigencias del proyecto, presentando 6,41 MPa, lo que supone un 52% superior al exigido.

Con respecto a las resistencias residuales a flexotracción a los 28 días exigidas por los proyectos, para el f_{r1} se observan variaciones 3 a 4,8 MPa, siendo las del Proyecto de la campaña experimental (CSST) las de menor exigencias. En cuanto a los resultados de flexotracción de esta investigación, presentan resultados en consonancias con los exigidos por los proyectos, presentando un valor medio de 4,43 MPa, representado un valor de 43% superior al exigido por proyecto. Mientras que los resultados de resistencia residual f_{r3} presentan exigencias de 2,5 a 3,4 MPa, donde en la presente investigación muestra un resultado promedio de 6,59 MPa.

Tabla 5.9 – Experiencias internacionales de túneles con dovelas prefabricadas de anillos de revestimiento

Proyecto	DOHA	NWRL	Crossrail C-305	Proyecto Campaña Experim.	
Función	TM	TM	TF	CSST	
Lugar	Qatar	AUS	GB	CA	
Año	2019	2019	e.c.	e.c.	
Diámetro interno, D_{int} [m]	canto 2,20	6,17	6,2	3	
Espesor, e [m]	-	0,3	0,3	0,2	
Relación D_i / e [-]	-	20,6	20,7	15	
Reforzamiento	Fibra metálica	•	•	•	
	Fibra plástica			•	
Hormigón	Min, res, característica a comp, f_{ck,min} [N/mm²]	12	12 (6 h) 20 (24 h)	15 (24 h) 20	
	Res. característica comp, f_{ck,28} a los 28 días [N/mm²]	50	50	50-60 50	
	f_{kft} LOP (MPa)	4,8	4,2	5 4,2	
Resistencias residuales a flexotracción [MPa]	Edades tempranas	f_{R1} (0,5 mm)	1,5	-	-
		f_{R3} (3,5 mm)	1	-	-
	Edades a 28 días	f_{R1} (0,5 mm)	3	-	4,8 3
		f_{R3} (3,5 mm)	2,5	3	3,4 -

Por otra parte, las resistencias residuales a edades tempranas cumplen con las exigencias del proyecto de la obra, donde la estimación de ensayos muestra un f_{r1} de 3,47 MPa lo que supone un cumplimiento del requerimiento exigido.

Los resultados mostrados demuestran que el hormigón y el método de curado acelerado empleado en el presente capítulo cumplen con los requerimientos exigidos por diversos diseños en distintos casos actuales de túneles, donde los resultados logran la resistencia mínima establecida por varios casos en concreto.

5.6. CONCLUSIONES

Tras analizar el comportamiento del HRFP fabricado, se ha observado su influencia a edades tempranas mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas. Fue posible constatar que tanto para edades tempranas (método de maduración) como para los ensayos a curado convencional, en función al control de calidad el tipo de hormigón empleado es plenamente factible.

En base a los resultados obtenidos, se pueden derivar las conclusiones específicas descritas a continuación.

- Los resultados a compresión del hormigón a edad de 7h (método del curado acelerado), presenta un valor medio de 28,22 MPa, mientras que el resultado a la edad de 28d presenta un valor medio de 59,5 MPa. Esto quiere decir, que mediante a método de curado acelerado obtenemos el 47% de la resistencia a compresión en comparación a los 28 días de curado.

- En los ensayos de flexotracción, la resistencia posfisuración mínima se obtiene para un ancho de fisura de 0,5 mm. No obstante, a medida que el CMOD aumenta, la resistencia residual aumenta de una manera significativa en donde a los 3,5 mm se obtuvo una resistencia promedio de 6,54 MPa, lo que supone un aumento del 49% respecto al f_{R1} .
- En el ensayo Barcelona, se observa como la madurez del hormigón influye en la resistencia de manera significativa en la fase elástica-lineal del material y la fase de transición, donde a la resistencia pico del material a 28 días de curado convencional presenta un aumento de la resistencia de un 109%. Por el contrario, las resistencias residuales no se ven influenciadas de manera significativa en función al tiempo de curado del hormigón, comprendiendo resistencias residuales parecidas entre sí, siendo el método acelerado el que presenta menores resistencias residuales.
- La correlación obtenida en esta investigación, proporciona valores medios de resistencias residuales muy similares a los resultados del ensayo a UNE-EN 14651; Siendo los datos de la correlación inferiores a los resultados de la campaña experimental. Dicho resultado indica que el ajuste obtenido con la correlación empleada es precisa para la dosificación empleada.
- Finalmente, a partir de las experiencias nacionales e internacionales de túneles con dovelas prefabricadas de anillo de revestimiento, se ha verificado que el hormigón y el método de curado acelerado empleado en el presente capítulo cumplen con los requerimientos exigidos por diversos casos actuales de túneles, donde los resultados logran la resistencia mínima establecida por distintos requerimientos.

6. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE FIBRAS NO METÁLICAS EN HRF

6.1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibra (HRF) ha demostrado ser un material competitivo en gran cantidad de tipos de estructuras (Di Prisco & Plizzari, 2009; Walraven, 2009). Es evidente que la contribución estructural de las fibras en el comportamiento postfisuración del HRF en función de su dosificación (cuantía) en la matriz de hormigón resulta de gran interés. Por lo cual, el hecho de conocer el contenido de las fibras plásticas en el HRF, además de ser necesario para el control del material, puede ser una gran ventaja en el diseño estructural.

De acuerdo con los estudios realizados en los capítulos anteriores sobre la caracterización del HRF, en este capítulo se implementará una metodología para la determinación del contenido, dado que como se ha visto en el Capítulo 2, no existe ninguna metodología económica que permita la determinación mediante ensayos no destructivos. Esta metodología consiste en determinar el contenido de fibras a partir de un ensayo no destructivo, mediante varios prototipos basados en mediciones de impedancia eléctrica que permitan comprobar la cuantía de las fibras en las dovelas tras su fabricación.

6.1.1. Objetivos

El objetivo general del presente capítulo es determinar el contenido de fibras mediante varios prototipos basados en mediciones de impedancia eléctrica en probetas de hormigón. Para ello, los objetivos específicos que se persiguen con este estudio son:

- Verificar si las medidas de impedancia eléctrica son sensibles a la presencia de fibras plásticas estructurales.
- Determinar qué metodología de medida es la más adecuada para la determinación del contenido de fibras.
- Verificar si la metodología seleccionada permite diferenciar entre contenidos de fibras.

6.1.2. Organización del estudio

De cara a alcanzar los objetivos propuestos, se plantea una hipótesis inicial, según la cual, es posible evaluar el contenido de fibras plásticas en HRF a partir de una ventana temporal en el fraguado del hormigón. El resultado de esta investigación podría facilitar el desarrollo de una prueba que sea capaz de caracterizar el contenido de las fibras.

Para ello, la Figura 6.1 muestra el organigrama correspondiente a la metodología de trabajo aplicada para la obtención de las medidas de impedancia eléctrica, a partir de distintos métodos de medida. En el apartado 6.2 se desarrolla una descripción detallada de la campaña experimental a realizar. El apartado 6.3 aborda el análisis de los resultados obtenidos a partir de las medidas de impedancia eléctrica a 2 hilos (2w). En el apartado 6.4 se propone realizar medidas a cuatro hilos (4w), método considerado más sensible para realizar un análisis en profundidad mediante medidas de conductividad eléctrica e iónica, teniendo en cuenta las muestras en estado seco y mojado. Finalmente, el estudio se finaliza en el apartado 6.5. donde se realiza el último estudio de validación, mediante medidas de impedancia eléctrica a partir de una célula de medida capacitiva.

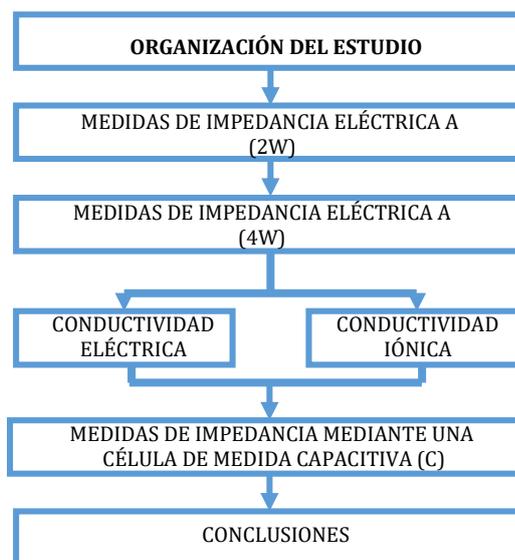


Figura 6.1 – Metodología de trabajo para la obtención de las medidas de impedancia eléctrica.

6.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

6.2.1. Dosificaciones y materiales

Con objeto de realizar una amplia validación de las medidas de impedancia eléctrica, se han considerado dos tipos de hormigón: un hormigón convencional (HC) y un hormigón de altas prestaciones (UHPC). La principal diferencia entre ambas dosificaciones es el esqueleto granular y el contenido de cemento. Se ha seleccionado esta gran variación en la granulometría, ya que las medidas de impedancia eléctrica dependen fundamentalmente de la porosidad del material y la tortuosidad del sistema.

En la Tabla 6.1 se presentan las dosificaciones de las mezclas de hormigón empleadas, tanto del HC como del UHPC.

Tabla 6.1 – Dosificación de las mezclas de hormigón

Componente	Dosificación [kg/m ³]	
	HC	UHPC
Arena 0/4	870	--
Arena de sílice SF 0/7	--	1161
árido 4/10	585	--
árido 10/20	400	--
agua	180	110
CEM I/52,5 R	360	800
Glenium ACE 425	3,6	30
Meyco MS 685	--	57
Betoflow	--	200

Con la intención de añadir variables al estudio, para cada tipo de hormigón se han considerado contenidos de macro fibra plástica de 0 (hormigón de referencia), 3, 6 y 9 kg/m³, teniendo en cuenta 2 muestras idénticas para cada contenido de fibra. La fibra plástica utilizada para este estudio es la PP4, utilizada en los capítulos anteriores, correspondiente a la de mejores prestaciones en el *Capítulo 3*.

6.2.2. Métodos de caracterización

La corriente eléctrica es un movimiento de partículas cargadas producido por un campo aplicado. Una de las características más importantes de un material sólido es su capacidad para transmitir la corriente eléctrica, lo cual es conocido como conductividad eléctrica. En la mayoría de los materiales esas partículas que se mueven son electrones, que dan lugar a una conductividad electrónica, sin embargo, en otros sistemas es el movimiento de los iones el que transmite la corriente es la conductividad iónica.

El origen de esos cambios de resistencia se puede asociar a la presencia o ausencia de fibras plásticas en su interior ya que la resistencia eléctrica de las fibras es muy alta, es decir, son aislantes. Con la finalidad de detectar de forma indirecta, pequeños cambios de la impedancia eléctrica dentro del HRF a partir de cambios de conductividad eléctrica (electrónica o iónica), se ha propuesto realizar medidas de impedancia eléctrica a 4 hilos

(4w Figura 6.2b), medidas de impedancia eléctrica a (2w Figura 6.2c) y finalmente medidas de impedancia eléctrica a partir de una célula de medida capacitiva.

Todas las medidas de impedancia eléctrica se han realizado con un analizador de impedancia Agilent HP 4192A. Se ha de medir con una tensión eficaz de excitación de $V_{hc}=1$ V, un barrido logarítmico de frecuencias de 10 Hz a 1 MHz, con 10 puntos por década, automatizado mediante LabVIEW. Para las condiciones de medida a 4w se le ha agregado un amplificador de instrumentación Gersing (1991).

Acorde con ambas mediciones, los electrodos de corriente se configuran mediante dos mallas de acero paralelas en el interior de las probetas, centradas y separadas 10 cm, mientras los electrodos de tensión internos se han configurado mediante sendos espárragos M6 centrados y separados 5 cm. Esta configuración garantiza que la corriente sea distribuida uniformemente en la probeta, de tal manera que todas las zonas sean capaces de contribuir de manera similar a la impedancia total de la muestra.

De acuerdo a las medidas a 2w, las mallas de acero se han tomado como electrodos de medida, en donde mide la impedancia eléctrica a partir de la conductividad electrónica en probetas a corta y media edad.

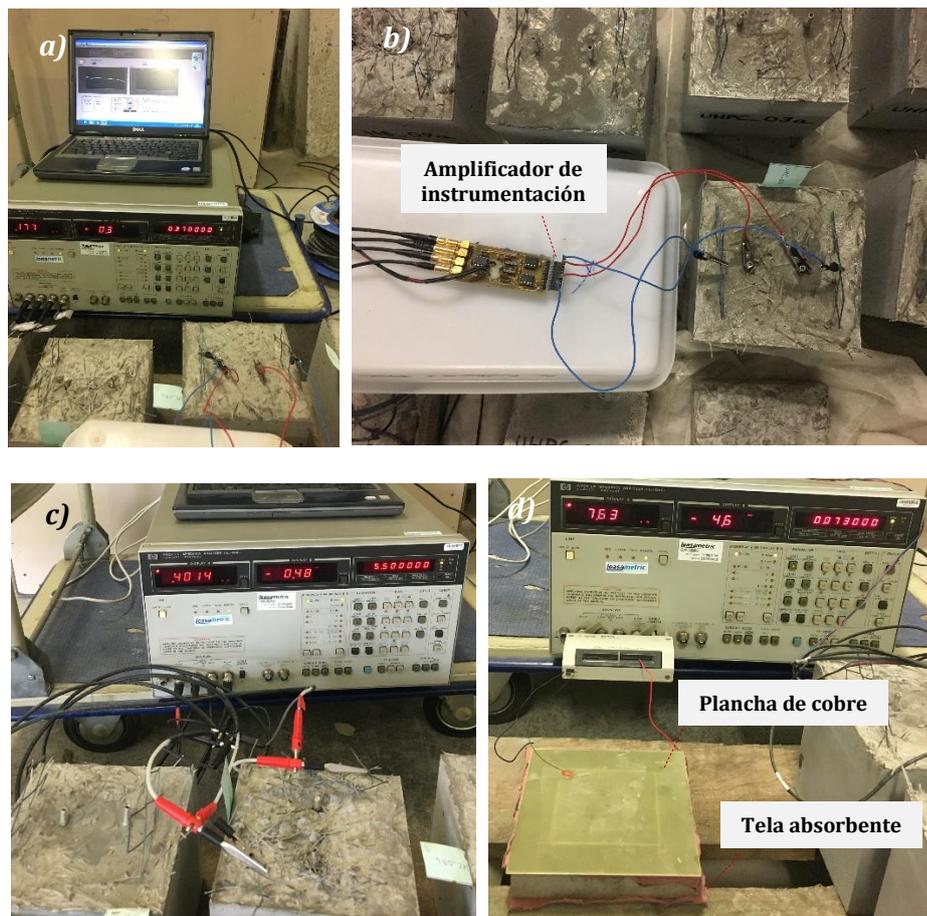


Figura 6.2 – Configuración del ensayo: medida de impedancias a 4w a). Amplificador de instrumentación colocado para las medidas a 4w b). medidas a 2w c). medidas de capacitancia d).

En cuanto a las medidas a 4w se consideran probetas a corta, media y larga edad. La impedancia eléctrica se mide a partir de cambios de conductividad tanto electrónica como iónica. Para determinar los cambios de conductividad iónica se ha adoptado una configuración especial. Las probetas se han colocado sobre un bastidor el cual permite soportar las láminas de cobre a utilizar, junto con las esponjas saturadas y escurridas en solución salina (NaCl).

Finalmente, se ha medido la impedancia eléctrica de una célula de medida capacitiva (C) consistente en dos planchas de cobre de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ separadas 2 cm y como dieléctrico losetas de hormigón de $15 \times 15 \times 2 \text{ cm}^3$ (Figura 6.2d). El contacto eléctrico en la interfase cobre-hormigón se ha facilitado con tela de algodón empapada (y escurrida) en solución salina saturada (NaCl). Se ha medido directamente entre las dos superficies de $15 \times 15 \text{ cm}^2$.

6.2.3. Proceso de producción

La fabricación de las dosificaciones propuestas tuvo lugar en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la UPC. Para la fabricación de todas las amasadas, se ha utilizado un mezclador de eje vertical con una capacidad máxima de 30 litros. En el caso de las *medidas de impedancia eléctrica a 2 y 4 hilos*, se moldearon probetas cúbicas de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ (Figura 6.3). Por cada tipo de hormigón se han fabricado 8 probetas (16 en total). En cuanto a las medidas de la *impedancia eléctrica de una célula de medida capacitiva*, se moldearon losetas de hormigón de $150 \times 150 \times 20 \text{ mm}^3$ (Figura 6.4b), con un contenido de fibra de 0 y 9 kg/m^3 . Por cada tipo de hormigón se han fabricado 2 probetas (4 en total).

Teniendo en cuenta lo anterior, para medir el flujo de la corriente en *medidas de impedancia eléctrica a 2 y 4 hilos*, los electrodos de corriente se han configurado mediante dos mallas de acero paralelas dentro de la muestra, centradas y separadas por 10 cm, los electrodos de tensión se han configurado mediante 2 espárragos de fijación de acero inoxidable, centrado y separados por 5 cm. (Figura 6.3 y Figura 6.4a).

Esta configuración considera añadir mallas en los extremos, con el fin de evitar que las líneas de corrientes dibujen una forma elíptica que, dejarían los bordes sin corriente y sin contribución al cómputo de impedancia. Si los electrodos de corriente del extremo del elemento son mallas, la corriente se distribuye uniformemente en la probeta y todas las zonas contribuyen igual a la impedancia total de la muestra.

Para distinguir entre los diferentes elementos a ensayar, de aquí en adelante se denominará "HC" al hormigón convencional y "UHPC" *Ultra high performance concrete* al hormigón de ultra altas prestaciones. A estas letras les sigue una cifra (C_f), la cual da referencia al contenido de fibra presentado en kg/m^3 . A esta cifra le sigue un dígito (d), que indica los días del hormigón tras ser fabricado. Por último, para casos particulares se incluye la condición mojado y secado utilizando mediante al código (M/S): [HC / UHPC] - C_f -d- [M / S].

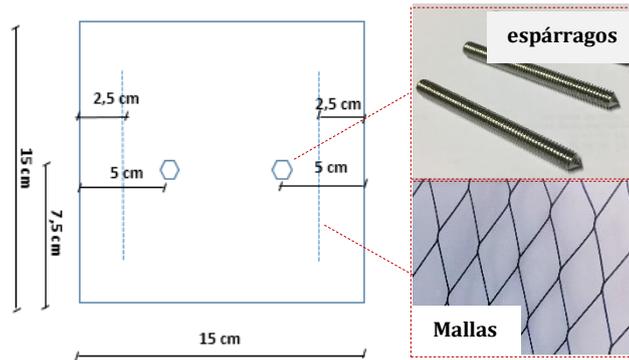


Figura 6.3 – Geometría de la muestra y ubicación de los electrodos.

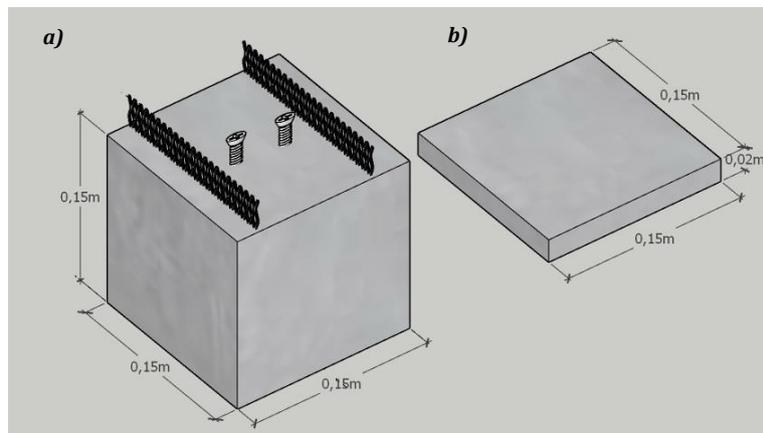


Figura 6.4 – Vista en perspectiva y dimensionamiento de probetas para: medidas de impedancia eléctrica a 2 y 4 hilos a). medidas de la impedancia eléctrica de una célula de medida capacitiva b).

6.3. MEDIDA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA A DOS HILOS

En este apartado se analizan los resultados correspondientes a las medidas de impedancia eléctrica a dos hilos (2w). La medición analizada en esta investigación pretende determinar la presencia de pequeños cambios de conductividad eléctrica dentro de un volumen de probetas fabricadas. La Figura 6.5 presenta los resultados correspondientes al HC formada por probetas sin fibras y probetas con dosificaciones de 3, 6 y 9 kg fibras/m³. Las gráficas se presentan en escala semi-logarítmica, representando el módulo de la impedancia (Ohm) en el eje de ordenadas y la frecuencia (Hz) en el eje de abscisas.

Con el fin de evaluar la variación de impedancia en función del tiempo de curado, la Figura 6.5 presenta mediciones a corta edad (6 horas, 1 día, 3 días y 7 días) y a media edad (14 y 28 días), donde se considera que el hormigón está curado. A fin de analizar en detalle la variación de la impedancia eléctrica para cada contenido de fibra, en la Tabla 6.2 se presentan los valores de impedancia eléctrica a distintas edades para una frecuencia de 100 Hz.

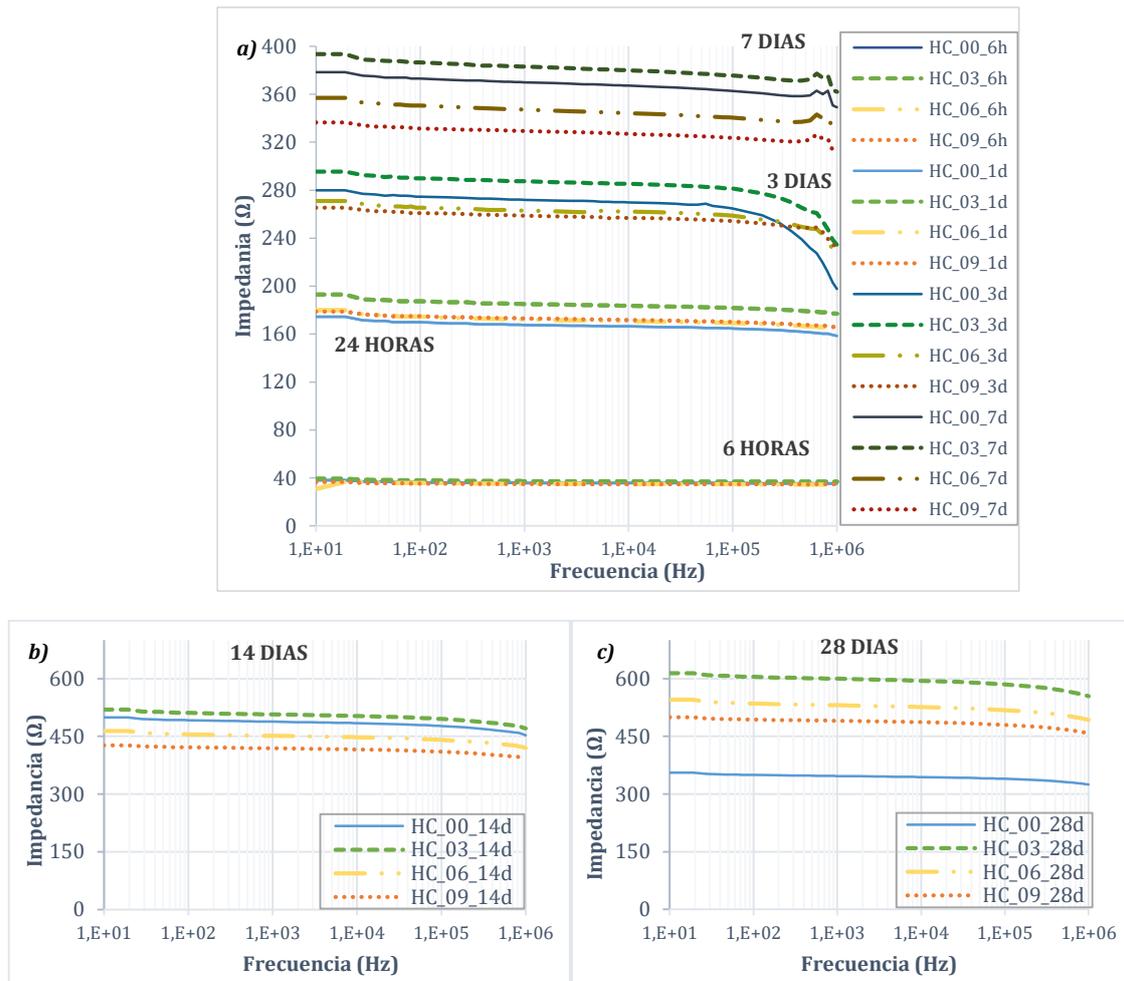


Figura 6.5 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC: a) corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).

Tabla 6.2 – Módulo de impedancia eléctrica del HC a frecuencia de 100 Hz.

	Frecuencia	100 Hz					
	Días	0,25	1	3	7	14	28
HC_00	Valor medio[Ω]	36,4	170,0	274,5	373,0	491,5	522,0
	Desv. Est [Ω]	3,4	12,7	23,3	46,7	71,4	-
HC_03	Valor medio[Ω]	37,9	187,5	290,0	386,5	511,5	605,0
	Desv. Est [Ω]	4,0	17,7	29,7	53,0	85,6	104,7
HC_06	Valor medio[Ω]	35,5	174,5	265,5	350,5	455,0	657,0
	Desv. Est [Ω]	7,4	34,6	54,4	82,7	117,4	31,1
HC_09	Valor medio[Ω]	35,4	175,0	253,0	331,5	422,0	493,5
	Desv. Est [Ω]	1,3	5,7	-	17,7	22,6	24,7

En la Figura 6.5 puede observarse como el máximo incremento respecto a los valores de impedancia eléctrica se produce con el aumento de la edad de curado del material. Tal circunstancia se debe al mayor tiempo de fraguado y al llenado de los poros, lo que dificulta el paso de la corriente eléctrica.

En lo que respecta a la influencia del contenido de fibras en las medidas de impedancia eléctrica, no se aprecian variaciones significativas obtenidas en los distintos

tiempos de curado en función al contenido de fibras. Sí que a mayor edad de curado se observa una mínima separación entre los valores de impedancia acorde al contenido de fibras, sin atribuir a ningún resultado esclarecido. Con respecto a los resultados obtenidos a 28 días, las probetas sin fibras presentan el menor valor de impedancia, lo que corresponde a una magnitud aproximadamente del 59% inferior respecto a la muestra del HC_09_28d.

En la Figura 6.6 se presentan las gráficas de diagrama de bode correspondientes al UHPC. Al igual que el HC se presenta mediciones a corta edad (6 horas, 1 día, 3 días y 7 días) y a media edad (14 y 28 días). La Tabla 6.3 se presentan los valores de impedancia eléctrica a distintas edades para una frecuencia de 100 Hz.

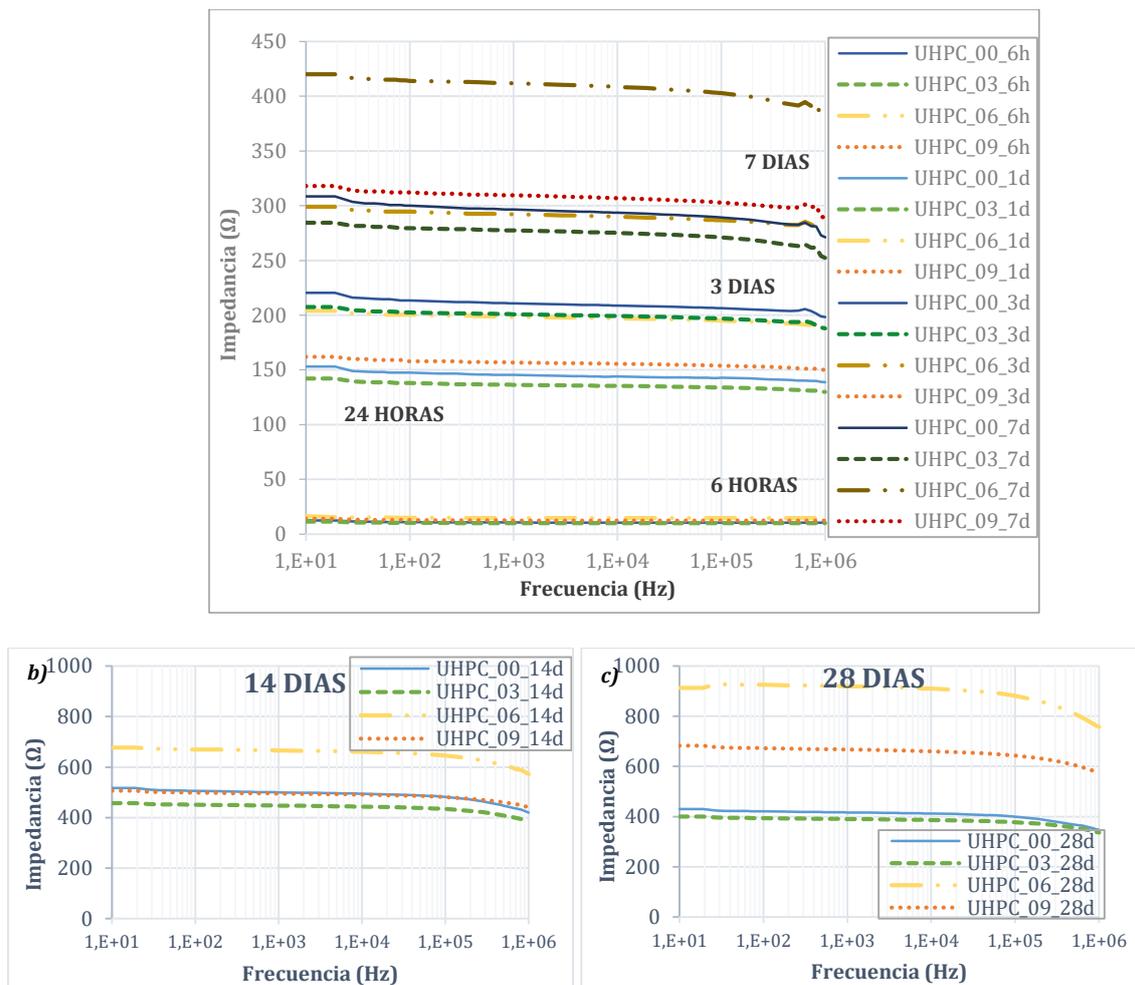


Figura 6.6 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC: a) corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).

Al igual que el HC, en la Figura 6.6 puede observarse que a mayor aumento de la edad de curado, mayor valor de impedancia eléctrica se obtiene. En general, no se aprecian diferencias significativas entre los valores absolutos de impedancia eléctrica para ninguna edad de curado. A partir de la media edad se observa que la impedancia eléctrica para el UHPC es mayor que para el HC, ya que tiene una menor porosidad. La diferencia de impedancia eléctrica del UHPC correspondientes a la corta y mediana edad indica que el

proceso de fraguado continua hasta los 28 días, suponiendo una acelerada evolución en el cierre de los poros del hormigón, en comparación con el HC.

Tabla 6.3 – Módulo de impedancia eléctrica del UHPC a frecuencia de 100 Hz.

	Frecuencia	100 Hz					
	Días	0,25	1	3	7	14	28
UHPC_00	Valor medio[Ω]	11,0	147,5	213,5	300,0	505,5	421,0
	Desv. Est [Ω]	1,1	27,6	40,3	59,4	89,8	253,1
UHPC_03	Valor medio[Ω]	10,3	138,0	202,5	279,5	450,5	393,5
	Desv. Est [Ω]	0,0	5,7	10,6	12,0	7,8	280,7
UHPC_06	Valor medio[Ω]	15,0	200,5	294,5	414,0	670,0	925,0
	Desv. Est [Ω]	0,2	0,7	0,7	2,8	2,8	17,0
UHPC_09	Valor medio[Ω]	12,8	158,0	228,0	312,0	499,0	672,0
	Desv. Est [Ω]	-	-	-	-	-	-

En cuanto a la influencia del contenido de fibras en las medidas de impedancia eléctrica, no se aprecian variaciones significativas obtenidas en los distintos tiempos de curado en función al contenido de fibras. Sin embargo, para las medidas a 28 días de curado se aprecia una gran diferencia entre las muestras sin fibras versus las amasadas de **06 kg/m³** lo que corresponde para una frecuencia de 100Hz una variación porcentual del 119%.

Esta variación es debida a la tolerancia de la posición de los electrodos, lo cual enmascaran los resultados debido a la interacción entre la electricidad y la fibra de hormigón. Con objeto de evitar el efecto de la tolerancia de posición de los electrodos, la Figura 6.7 presenta la relación de impedancia eléctrica ante frecuencias de (100 kHz/1k Hz) tanto para el HC como el UHPC, conduciéndose a resultados en relativo.

Según los resultados mostrados en la Figura 6.7a y b, tanto para el HC como el UHPC, se aprecian diferencias en impedancias a una escala mínima, obteniendo una variación lineal a partir de los 14 días de curado. En donde a priori se intuye una diferencia entre las amasadas con y sin contenido de fibras, para ambos tipos de hormigones, es en las correspondientes a la mayor cuantía, las cuales muestran la mayor relación de impedancia eléctrica.

La Figura 6.7c y d muestra la relación de impedancia eléctrica con los distintos contenidos de fibras analizados. En el caso del HC, en general no se aprecia una tendencial lineal en los resultados, obteniendo resultados muy parecidos entre sí, exceptuando los resultados de las muestras a los 3 días. En este caso, sí se aprecia que, a mayor cuantía, mayor es la relación de impedancia.

En el caso del UHPC (Figura 6.7d) a partir de los 7 días del fraguado del hormigón, existe una variación significativa en los resultados de 0 a 9 kg/m³, donde a mayor contenido de fibra se observa un aumento de la relación de la impedancia. Sin embargo, las probetas medidas a 28 días, no siguen la misma tendencia, ya que se observa una reducción de la relación de impedancia para probetas de 6 kg/m³, debido a la tolerancia de posición de los electrodos, el cual enmascaran los resultados.

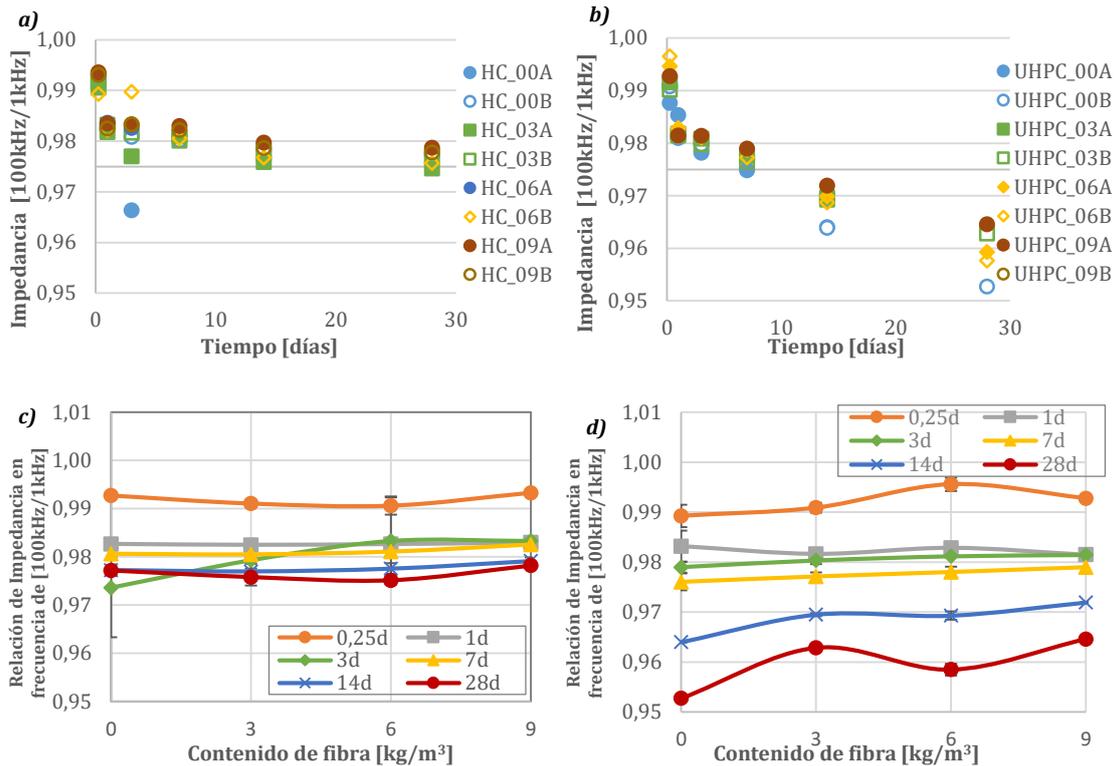


Figura 6.7 – Relación de Impedancia Eléctrica frente a frecuencias de (100kHz/ 1 kHz): y Tiempo de curado en HC a). y Tiempo de curado en UHPC b). y Contenido de fibras en HC c). y Contenido de fibras en UHPC d).

La impedancia eléctrica depende de las medidas del material y los puntos de contacto. Dentro de la composición del hormigón, las fibras plásticas crean nuevas fases y por tanto nuevos efectos que no existían en el hormigón sin fibras. Entre las nuevas fases, la más influyente es la fase correspondiente al límite de fibra-cemento. Este comportamiento es esperable, ya que en esta fase se encuentran presentes iones en reacción con el agua del fraguado, dificultando el paso de la corriente y por ende aumentando por tanto el módulo de impedancia (González et. al, 2011).

Cálculo de la resistividad eléctrica a 2w

Se ha identificado que las técnicas de medición de resistividad eléctrica están estrechamente relacionadas para el control de calidad y la evaluación de durabilidad del concreto (Nadelman, E.I., and Kurtis, 2014), precisamente debido a que la resistividad es directamente proporcional al grado de saturación de agua (Zornoza et. al, 2015). Se espera que la adición de fibras plásticas, aunque no contribuya directamente, influya en la resistividad eléctrica de otras maneras. La impedancia eléctrica se describe mediante la Ecuación 6-1 y se compone de una parte real (resistencia eléctrica, R) y una parte imaginaria (reactancia, X), R y X se obtienen a partir de la Ecuación 6-2 y la Ecuación 6-3.

$$Z = R + j . X \quad [6-1]$$

$$R = Z . \cos \left(\frac{\phi . \pi}{180} \right) \quad [6-2]$$

$$X = Z \cdot \sin\left(\frac{\phi \cdot \pi}{180}\right) \quad [6-3]$$

Finalmente, la resistividad eléctrica (ρ , en $\Omega\cdot m$) se obtiene utilizando la ecuación:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad [6-4]$$

En donde R es la resistencia en ohms, S la sección transversal en m^2 y l la longitud en m. Su valor describe el comportamiento del material frente al paso de la corriente eléctrica, considerando un valor alto de resistividad indica una baja conducción, mientras que un valor bajo indica una buena conducción.

Aunque las mediciones se obtuvieron en diferentes frecuencias, deben determinarse a qué frecuencia debe calcularse la resistividad eléctrica. Algunos autores determinan una referencia que proporciona la frecuencia nominal a la que se calculó la resistividad eléctrica, en el caso de (B. Chen, Wu, & Yao., 2004), han elegido 100 kHz como el valor de C_t (límite de capacitancia) en sus experimentos. A continuación, para esta investigación, se obtienen los valores de resistividad eléctrica de **$\rho 100$ kHz**.

La Figura 6.8 presenta los resultados de resistividad eléctrica a frecuencias de 100 kHz, correspondientes al HC y al UHPC formada por probetas sin fibras y probetas con dosificaciones de 3, 6 y 9 kg fibras/ m^3 . En este caso se han tomado en consideración los resultados a 1 y 28 días de curado.

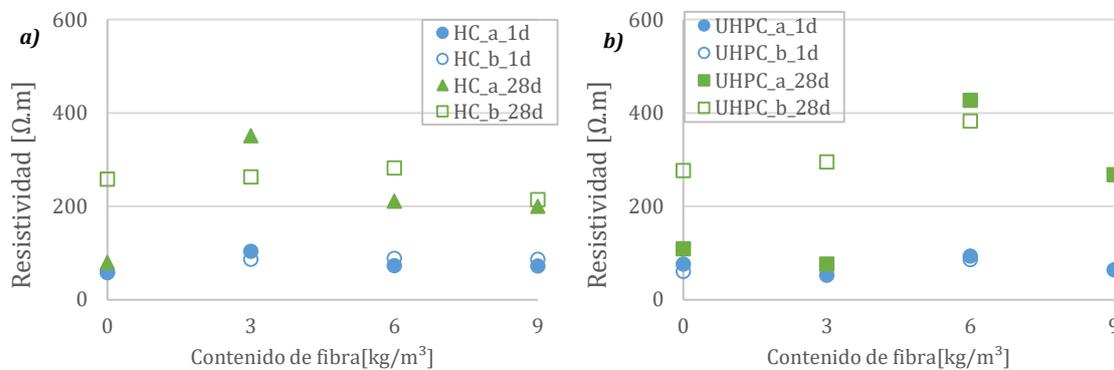


Figura 6.8 – Resistividad eléctrica a frecuencias de 100 y Cuantía de fibras en: HC a). UHPC b).

En cuanto a los resultados correspondientes a la resistividad en las amasadas de HC, no se aprecian diferencias significativas en cuanto a la variación en el contenido de fibra ya que los valores son muy similares entre sí. Pero si se observa una diferencia de resistividad en cuanto a los tiempos de curado, siendo las amasadas correspondientes a los 28 días de curado las que presentan mayor valor de resistividad con una variación porcentual de aproximadamente del 200% en comparación de las medidas a 1 día de curado.

Los resultados de resistividad correspondientes a las amasadas de UHPC, presenta la misma tendencia que el HC, exceptuando una variación respecto a las amasadas con la cuantía de 6 kg/m^3 , en donde se presenta un aumento de la resistividad; según los

resultados de impedancia eléctrica a (2w). Para ambos tipos de hormigón se ha demostrado que a mayor edad de curado se aprecia una mayor resistividad y, por ende, una menor conducción en el material.

6.4. MEDIDA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA A CUATRO HILOS

En este apartado se pretende realizar un segundo estudio sobre los resultados correspondientes a las medidas de impedancia eléctrica, en este caso a cuatro hilos (4w). Este método de medida es considerado como uno de los más sensibles ante la medición de impedancia eléctrica, ya que elimina la influencia de los electrodos en las medidas.

En el sub-apartado anterior, se ha observado el enmascaramiento debido a la tolerancia de posición de los electrodos, además, su influencia en el hormigón, donde los electrodos y el hormigón crean una nueva interfaz, y, por tanto, se manifiesta en los resultados de la resistencia eléctrica. Al igual que los ensayos a 2w del apartado 6.3, en las medidas a 4w, se evaluarán dos tipos de hormigón (HC y UHPC).

6.4.1. Medidas de impedancia eléctrica a partir de la conductividad eléctrica

La Figura 6.9 presenta los resultados de impedancia eléctrica correspondientes al HC con la finalidad de estudiar la variación de impedancia a corta edad (6 horas, 1 día, 3 días y 7 días) y a media edad (14 y 28 días). En la Tabla 6.4 presentan los valores de impedancia eléctrica a distintas edades para una frecuencia de 100 Hz.

En la Figura 6.9 puede observarse de manera análoga a los resultados a 2w, que a mayor tiempo de curado del hormigón, se ve reflejado en un aumento de impedancia eléctrica. En este punto, vuelve a surgir el efecto de fraguado, que, a mayor tiempo, dificultan el paso de la corriente eléctrica.

En lo que concierne a la influencia del contenido de fibras en las medidas de impedancia eléctrica, al séptimo día de curado del hormigón se aprecia una tendencia en los resultados de impedancia eléctrica. En este caso, a diferencia de los resultados a 2w, los valores de impedancia eléctrica correspondientes a las probetas sin fibras; presentan el mayor valor. Con respecto a los 28 días de curado; para una frecuencia de 100 Hz, las muestras sin fibras presentan un valor 20% superior a las muestras de HC_09_28d. Este comportamiento puede deberse a que las probetas con fibras crean una película de argamasa que recubre la superficie formando una interfase con la fibra, creando una mayor conducción y por consiguiente verse manifestado en una reducción del módulo de impedancia.

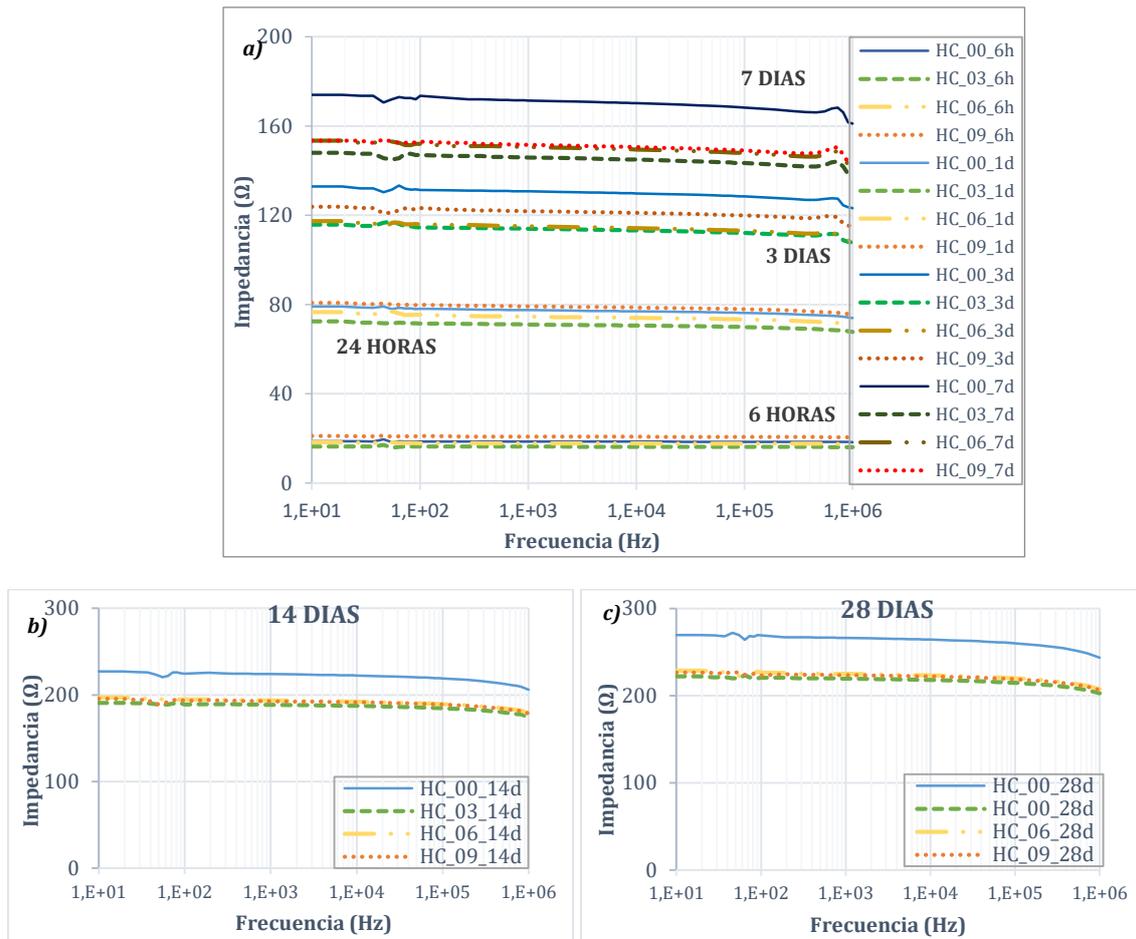


Figura 6.9 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC: a) corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).

Tabla 6.4 – Módulo de impedancia eléctrica del HC a frecuencia de 100 Hz.

	Frecuencia	100 Hz					
	Días	0,25	1	3	7	14	28
HC_00	Valor medio[Ω]	18,6	78,1	131,3	173,5	224,5	269,0
	Desv. Est [Ω]	2,7	5,2	10,9	20,5	27,6	36,8
HC_03	Valor medio[Ω]	16,4	71,4	114,5	147,0	189,0	220,5
	Desv. Est [Ω]	1,1	3,6	5,8	9,9	15,6	19,1
HC_06	Valor medio[Ω]	17,8	75,4	58,0	152,0	195,0	226,5
	Desv. Est [Ω]	0,4	2,7		7,1	14,1	13,4
HC_09	Valor medio[Ω]	21,0	79,9	123,2	153,0	193,0	223,0
	Desv. Est [Ω]	1,1	2,7	1,3	2,8	2,8	2,8

La Figura 6.10 presenta las gráficas de diagrama de bode correspondientes al UHPC. Al igual que el HC se presenta mediciones a corta edad (6 horas, 1 día, 3 días y 7 días) y a media edad (14 y 28 días). La Tabla 6.5 presenta los valores de impedancia eléctrica a distintas edades para una frecuencia de 100 Hz.

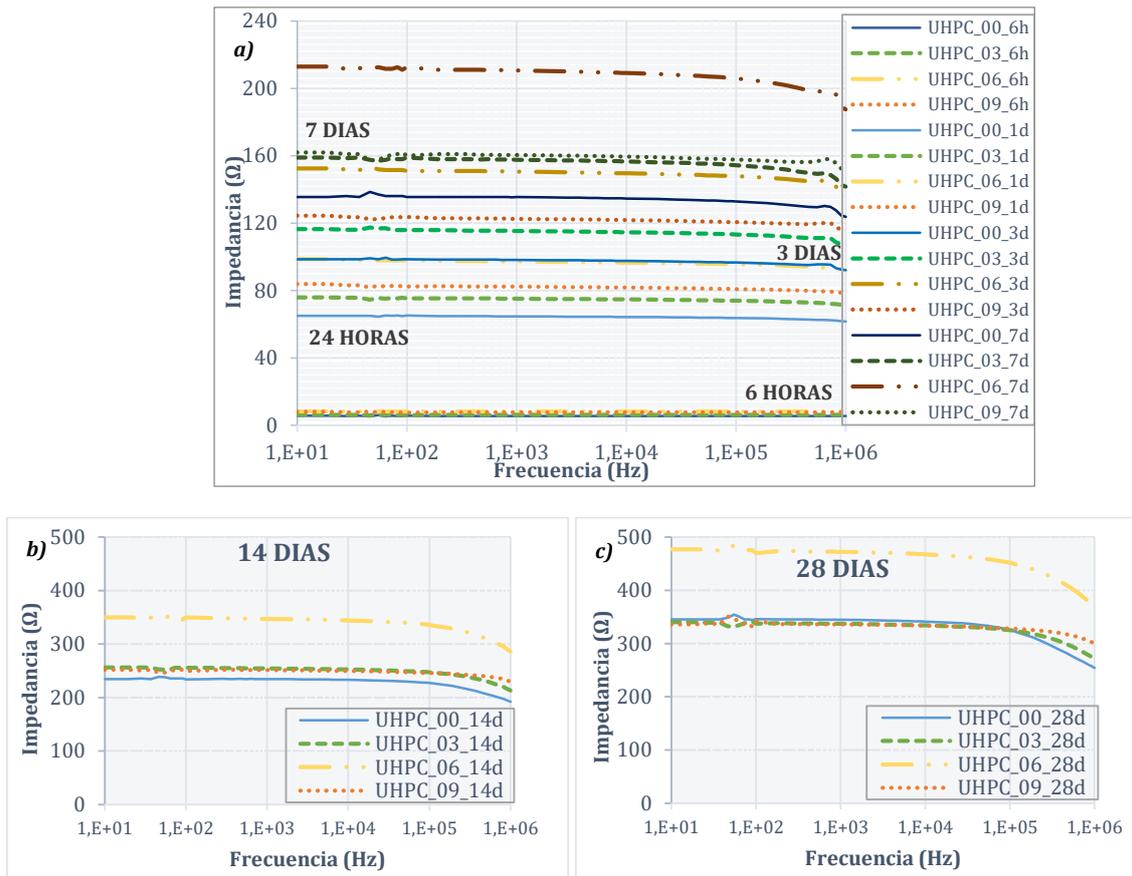


Figura 6.10 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al UHPC: a) corta edad: 6 hrs, 1, 3 y 7 días de curado a). mediana edad: 14 días de curado b). 28 días de curado c).

Tabla 6.5 – Módulo de impedancia eléctrica del UHPC a frecuencia de 100 Hz.

	Frecuencia	100 Hz					
	Días	0,25	1	3	7	14	28
UHPC_00	Valor medio[Ω]	5,8	65,2	98,6	135,5	234,0	346,0
	Desv. Est [Ω]	0,5	3,1	4,8	0,7	33,9	26,9
UHPC_03	Valor medio[Ω]	6,1	75,4	115,9	159,0	255,5	337,0
	Desv. Est [Ω]	0,6	5,0	5,6	5,7	4,9	15,6
UHPC_06	Valor medio[Ω]	8,3	98,4	151,0	212,5	350,0	469,5
	Desv. Est [Ω]	1,4	15,6	26,9	34,6	50,9	60,1
UHPC_09	Valor medio[Ω]	11,0	117,2	185,8	261,5	479,5	400
	Desv. Est [Ω]	4,8	49,2	87,9	143,5	234,1	-

La Figura 6.10 muestra la influencia de la edad de curado en los resultados de impedancia eléctrica. Es notable observar un aumento de la impedancia eléctrica a mayor edad de curado.

En cuanto a la influencia del contenido de fibras en las medidas de impedancia eléctrica, no se observa una tendencia significativa entre los valores absolutos. Las diferencias observadas en el UHPC son menores, debido a que hay menos caminos para conducir la electricidad, y por ende, menos caminos para observar la interacción entre fibra y matriz. Otro factor de segundo orden podría ser que la tolerancia en la colocación de los

electrodos enmascara los resultados, produciendo un mayor valor de impedancias para las muestras con contenidos de fibras de 6 kg/m³. Para los 28 días de curado en una frecuencia de 100 Hz, las muestras de 6 kg/m³ presentan un valor 35% superior a las muestras sin fibras.

Después de los 28 días de curado, se ha procedido a realizar medidas de impedancia eléctrica a otras edades, con la finalidad analizar su comportamiento a largo plazo. A partir de ahora, se presentan los resultados de las muestras, tanto en estado seco (S) como en estado mojado (M), durante estadios posteriores de curado.

La Figura 6.11 presenta los resultados de impedancia eléctrica correspondientes al HC y UHPC en estado seco y mojado. Las muestras medidas a los 79 días de curado corresponden a las probetas en estado seco, mientras que las muestras ensayadas a los 93 días corresponden a las probetas mojadas y escurridas. Las muestras M han sido conservadas en agua durante más de 48 h, tiempo suficiente para considerar las muestras saturadas en su totalidad.

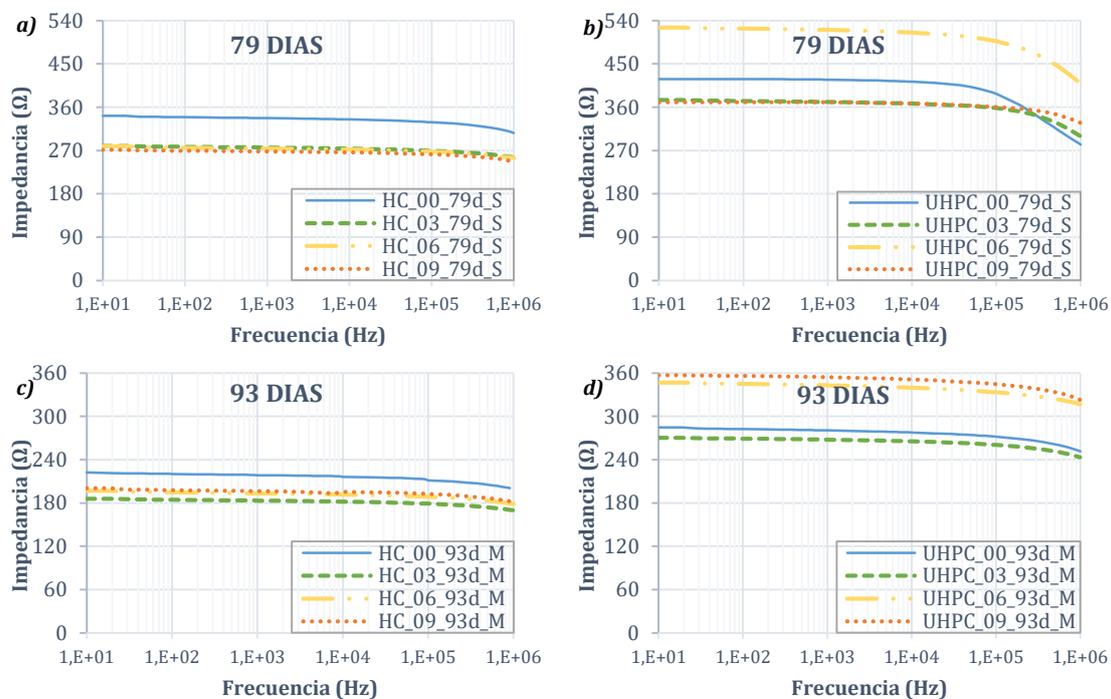


Figura 6.11 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes a: *a)* HC de 79d de curado en estado seco *b)* UHPC de 79d de curado en estado seco *c)* HC de 93d de curado en estado mojado *d)* UHPC de 93d de curado en estado mojado *d)*.

Los resultados de las muestras en estado seco (S), realizadas a los 79 días de curado del HC (Figura 6.11a), evidencian que el hormigón sin fibras presenta un aumento de impedancia eléctrica en comparación al hormigón con fibras de aproximadamente un 35%. Las muestras con fibras presentan un descenso de impedancia, que al igual a las medidas de hormigones con menor edad (4w) se debe a que las fibras crean nuevas fases (en especial la fase fibra-cemento) que contribuiría a amplificar el camino de conducción, y reducir la impedancia eléctrica.

En el caso del UHPC (Figura 6.11b) no se observa una reproducibilidad, en donde no se aprecia una tendencia en el comportamiento como el HC. Los resultados pueden dar respuestas a que el hormigón contiene menos caminos para conducir la electricidad, y menos caminos para ver la interacción entre fibra y matriz. De manera general, se percibe escasa diferencia en la variación de la impedancia con la frecuencias inferiores los 10 kHz (Segura, et. al, 2018). Una vez que se alcanza este valor, se observa una gran reducción en la impedancia.

Las medidas realizadas a los 93 días de curado (Figura 6.11c), evidencian que los HC presentan un comportamiento análogo a las muestras en estado seco, justificando la reducción de la impedancia eléctrica. En este caso, al sumergirlas, los poros se han rellenado de material conductor, y, por ende, habría un mayor camino de conducción. Debido a ello, la impedancia se reduce un 54%. Finalmente, las medidas en M del UHPC (Figura 6.11d), al igual que los resultados en S no se observa una reproducibilidad. Nuevamente, no se aprecia una tendencia en las mediciones a partir de un contenido de fibra.

Basándose en los resultados de impedancia eléctrica a 4w, la Figura 6.12 presenta la relación de impedancia eléctrica ante frecuencias de (100 kHz/1 kHz) tanto para HC como para UHPC a 1 a 28 días, conduciéndonos a resultados en relativo.

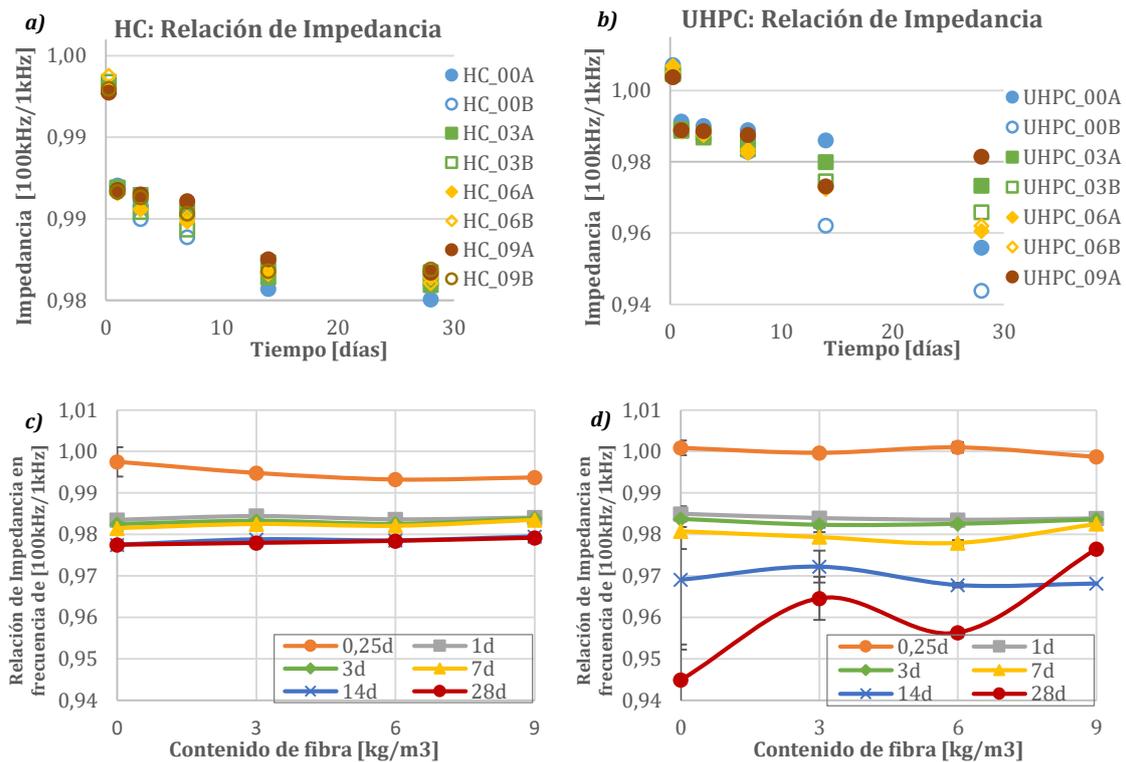


Figura 6.12 – Relación de Impedancia Eléctrica frente a frecuencias de (100kHz/ 1 kHz): y Tiempo de curado en HC a). y Tiempo de curado en UHPC b). y Contenido de fibras en HC c). y Contenido de fibras en UHPC d).

En la Figura 6.12a y b, se observan pequeñas diferencias en los valores de impedancia eléctrica, obteniendo una tendencia en los resultados a partir de los 7 días de curado, correspondientes al HC, mientras que para el UHPC se observa una tendencia en los resultados llegados a los 28 días del curado del hormigón. Esta diferencia se traduce en una

reproducibilidad en el contenido de fibras. A partir de la sensibilidad del ensayo, se evidencia la hipótesis inicial, que, a partir de una edad de fraguado del hormigón, es posible apreciar una variación en cuanto al contenido de fibra. Este comportamiento era esperable, ya que las muestras sin fibras contienen un menor camino de conducción produciendo un aumento del módulo de impedancia.

La Figura 6.12c y d presentan la relación de impedancia eléctrica con los distintos contenidos de fibras analizados. Tanto para el caso del HC como el de UHPC se observa que la relación de impedancia se reduce con la edad. En el caso del HC a partir de los 7 días de curado se aprecia una mínima tendencia en los resultados, en donde mayor edad de fraguado menor relación de impedancia. Sin embargo, para las muestras a 28 días de curado del hormigón, se observa que, a mayor contenido de fibra, mayor es la relación de impedancia, distinguiendo una variación significativa en los resultados de 0 a 9 kg/m³.

Nuevamente se observa una reducción de la relación de impedancia referente a las probetas de 6 kg/m³, en donde dicho comportamiento se explica en el apartado anterior refiriéndose al enmascaramiento de los resultados debido a la tolerancia a la posición de los electrodos.

Cálculo de la resistividad a partir de la conductividad eléctrica

La Figura 6.13 presenta los resultados de resistividad eléctrica a frecuencias de 100 kHz. correspondientes para HC y al UHPC con dosificaciones de 0, 3, 6 y 9 kg fibras/m³ correspondientes a las medidas en seco (S) y en mojado (M). En este caso se han tomado en consideración medidas del tiempo de curado a larga edad correspondiente a los 79 y 93 días de curado.

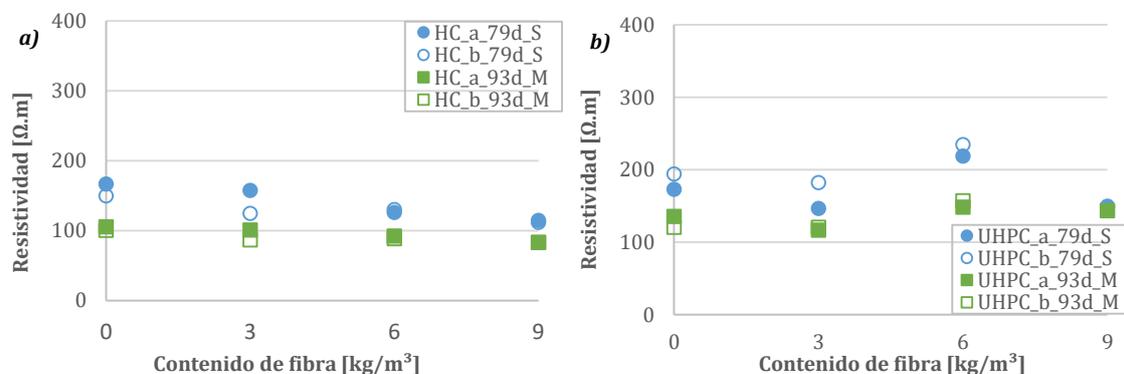


Figura 6.13 – Resistividad eléctrica a frecuencias de 100 kHz y Cuantía de fibras en: HC a). UHPC b).

La Figura 6.13 a muestra los resultados de resistividad eléctrica correspondientes al HC, tanto para el hormigón en estado seco (79 S) como para el hormigón en estado mojado (M). Las medidas correspondientes a la resistividad eléctrica de 4w, se han realizado siguiendo las mismas directrices de la resistividad eléctrica a medidas 2w. Para las mediciones correspondientes al HC, es notable observar una tendencia de disminución de la resistividad a medida que aumenta el contenido de fibra, por lo tanto, para ambos casos, un mayor contenido de fibra comporta una menor resistividad.

En lo que respecta las medidas UHPC (Figura 6.13b), no se observa una tendencia en los resultados. Sin embargo, se observa un salto significativo correspondientes a las medidas de las probetas con cuantía de 6 kg/m^3 , donde para todos los casos la resistividad aumenta. Este resultado se ha visto reflejado en las primeras mediciones de impedancia eléctrica a 4w.

6.4.2. Medidas de impedancia eléctrica a partir de la conductividad iónica

Al igual que la conductividad eléctrica, se han realizados las mismas medidas de impedancia eléctrica en conductividad iónica. Para la realización de estas medidas se ha tomado en consideración colocar las probetas sobre un bastidor, el cual es capaz de soportar las láminas de cobre a utilizar, junto con las esponjas saturadas y escurridas en solución salina (NaCl).

La Figura 6.14 presenta los resultados correspondientes al HC y UHPC en estado seco y mojado a un curado de larga edad. Las muestras medidas a los 127 d de curado presentan las probetas en estado seco (S), mientras que las muestras ensayadas a 143 d corresponden a las probetas mojadas y escurridas (M).

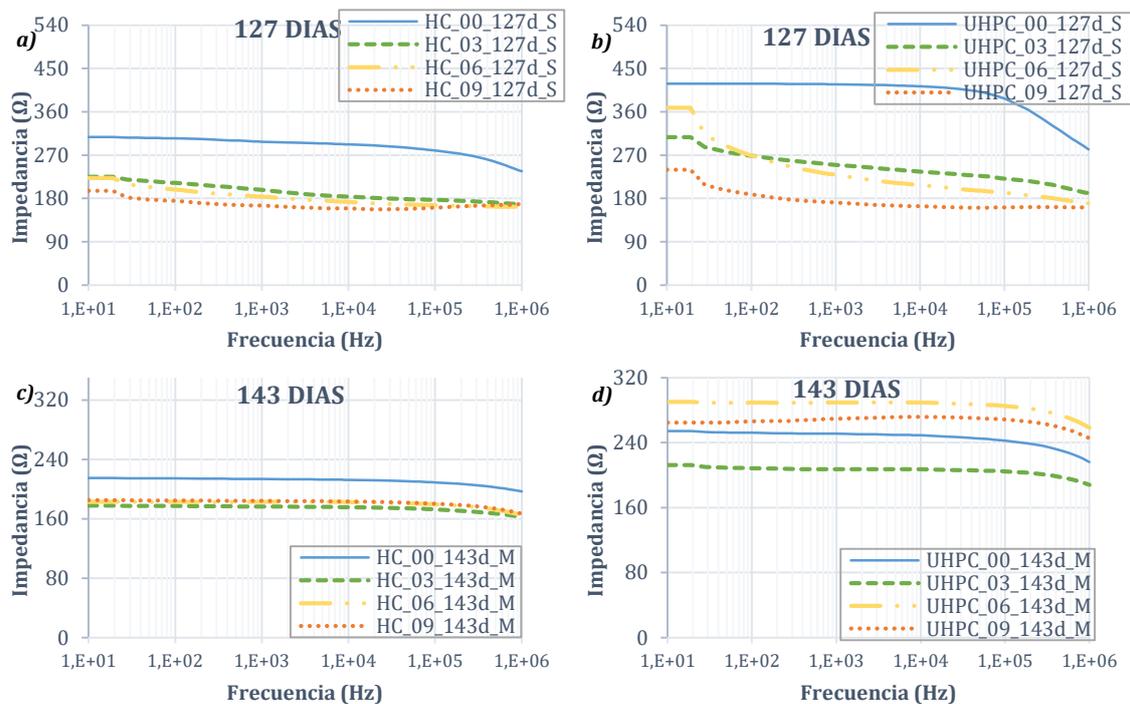


Figura 6.14 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al: HC de 127d de curado en estado seco a). UHPC de 127d de curado en estado seco b). HC de 143d de curado en estado mojado c). UHPC de 143d de curado en estado mojado d).

Los resultados de las muestras en estado seco (S), realizadas a los 127d del HC (Figura 6.14a y b), nuevamente evidencian una tendencia en los resultados, en donde a mayor contenido de fibras menor valor de impedancia eléctrica. En cuanto a las muestras de 143d no se considera una tendencia significativa entre los valores absolutos. Para los resultados en estado mojado del HC si se observa una distinción significativa entre el hormigón (sin fibra) versus el hormigón con fibras. En cuanto los resultados del UHPC no

se observa una reproducibilidad, al igual que los resultados anteriormente presentando en el sub-apartado 6.4.1.

Estos resultados pueden dar respuesta a los problemas de escurencia en las muestras que enmascaran las medidas. Si es de notar que las muestras en seco presentan mayor contenido de impedancia en comparación a las muestras saturadas, esto es debido a que las muestras saturadas presentan mayor camino de conducción y por ende hay una reducción de la impedancia eléctrica de orden general de un 41% aproximadamente.

Cálculo de la resistividad a partir de la conductividad iónica

La Figura 6.15 presenta los resultados de resistividad iónica a frecuencias de 100 kHz. correspondientes al HC y al UHPC formada por probetas sin fibras y probetas con dosificaciones de 3, 6 y 9 kg fibras/m³ correspondientes a las medidas (S) y (M). En este caso se han tomado en consideración los resultados a tiempo de 127 y 143 días de curado.

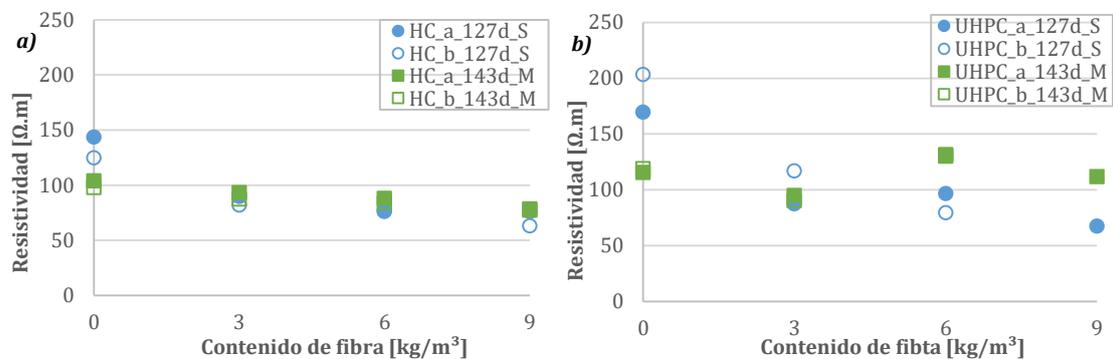


Figura 6.15 – Resistividad iónica a frecuencias de 100 kHz y Cuantía de fibras en: HC a). UHPC b).

Las medidas correspondientes a la resistividad a partir de la conductividad iónica, se han realizado siguiendo las mismas directrices de la resistividad eléctrica en estado seco y mojado. La Figura 6.15 presenta los resultados de la resistividad correspondientes al HC, en hormigón en seco (127 días) como en el hormigón saturado (143 días). Claramente se observa la misma tendencia en comparación a los resultados de resistividad por conductividad eléctrica, tanto para el HC como el de UHPC.

En el caso del HC es notable observar una tendencia en la disminución de la resistividad, a medida que aumenta la cuantía de fibras, por lo tanto, a mayor contenido de fibra, menor resistividad. En el caso del UHPC, no se observa una tendencia en los resultados, al igual que las medidas de la resistividad por conductividad eléctrica, se observa un salto significativo correspondientes a las medidas de las probetas con cuantía de 6 kg/m³, en donde para todos los casos la resistividad aumenta.

Esto conduce a una distinción entre las mediciones de probetas en estado seco como mojado. Para ambos tipos de hormigón, el estado seco muestra una reproducibilidad en los resultados, en donde a mayor contenido de fibras, mayor conductividad, y por ende menor valor de impedancia eléctrica. Este fenómeno concuerda con los resultados presentados por (Wen et. al, 2006) en morteros reforzados con fibra de carbono. En cambio, las muestras saturadas no representan una repetitividad en los resultados presentados, en donde

nuevamente se pone de manifiesto los problemas de escurrecias, conduciendo a variaciones en los resultados.

6.5. MEDIDA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE MEDIDA CAPACITIVA (C).

Este apartado se analiza el tercer estudio sobre los resultados correspondientes a las medidas de impedancia eléctrica, en este caso mediante una célula de medida capacitiva (C). Con estas medidas se pretende validar los cambios de conductividad eléctrica antes presentados y analizados sobre las medidas a 2w y 4w.

Al igual que los ensayos anteriores, se evalúan dos tipos de hormigón (HC y UHPC). La Figura 6.16 presenta los resultados correspondientes al HC, mostrando mediciones a corta edad (6 horas, 1 día, 3 días y 7 días) y a media edad (14 y 28 días), donde se considera que el hormigón está curado.

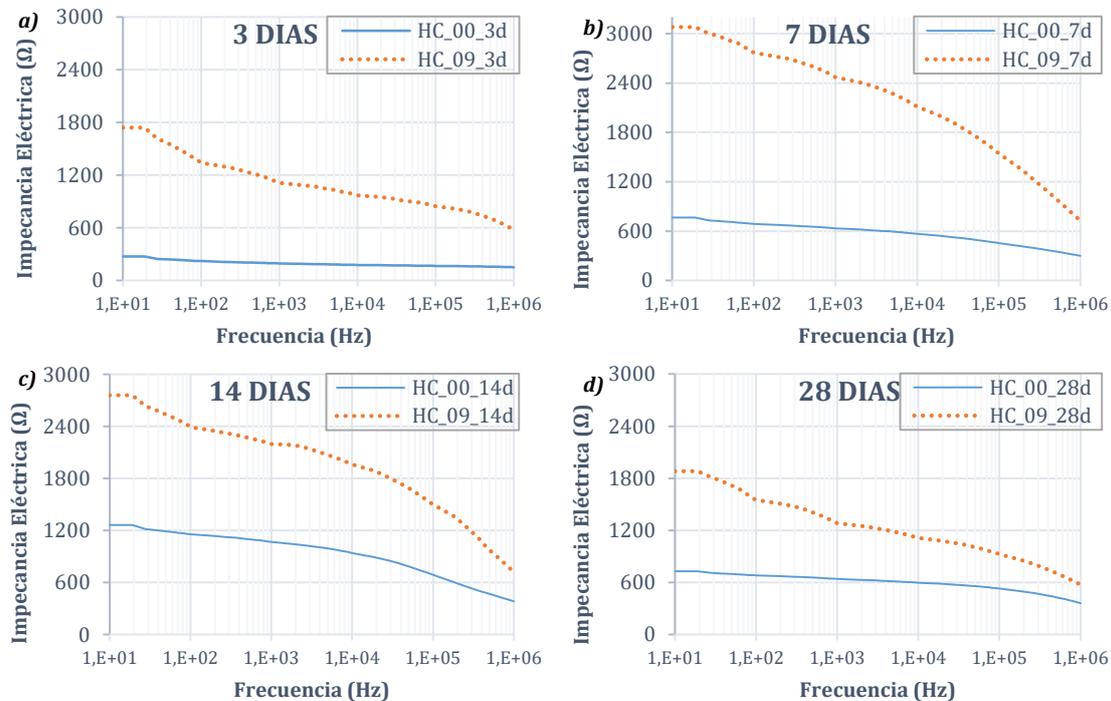


Figura 6.16 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al HC de: 3d de curado a). 7d de curado b). 14d de curado c). 28d de curado d).

Los resultados de las amasadas correspondientes al HC, evidencian que el hormigón con fibras presenta, para todos los casos, valores superiores que los medidos en el hormigón sin fibras.

Estos comportamientos ratifican los resultados mostrados en las medidas de impedancia a 2w en 28 días de curado, donde la probeta con fibras presentaba un gran aumento del valor del módulo de impedancia. Este comportamiento es debido ya que el aumento de la dosificación de fibras produce más fases fibra-cemento aumentando en este

caso la impedancia, descartando el límite de fibra con el árido, debido a que la fibra siempre está en contacto con las partículas del cemento e iones de por medio.

A pesar de que en todos los casos se aprecia diferencias de impedancia eléctrica, es notable detectar con mayor precisión, en los resultados correspondientes a 7 y 14 días, obteniendo diferencias porcentuales a frecuencias de 1kHz aproximadamente 300 y 180% respectivamente. Estos resultados verifican la hipótesis inicial, en que existe una ventana temporal en el fraguado del hormigón que permite visualizar la determinación de la existencia de fibras dentro del hormigón, en función tanto de la matriz del hormigón como de la fibra.

La Figura 6.17 presenta los resultados correspondientes al UHPC, mostrando mediciones a corta edad (6 horas, 1 día, 3 días y 7 días) y a media edad (14 y 28 días), donde se considera que el hormigón está curado.

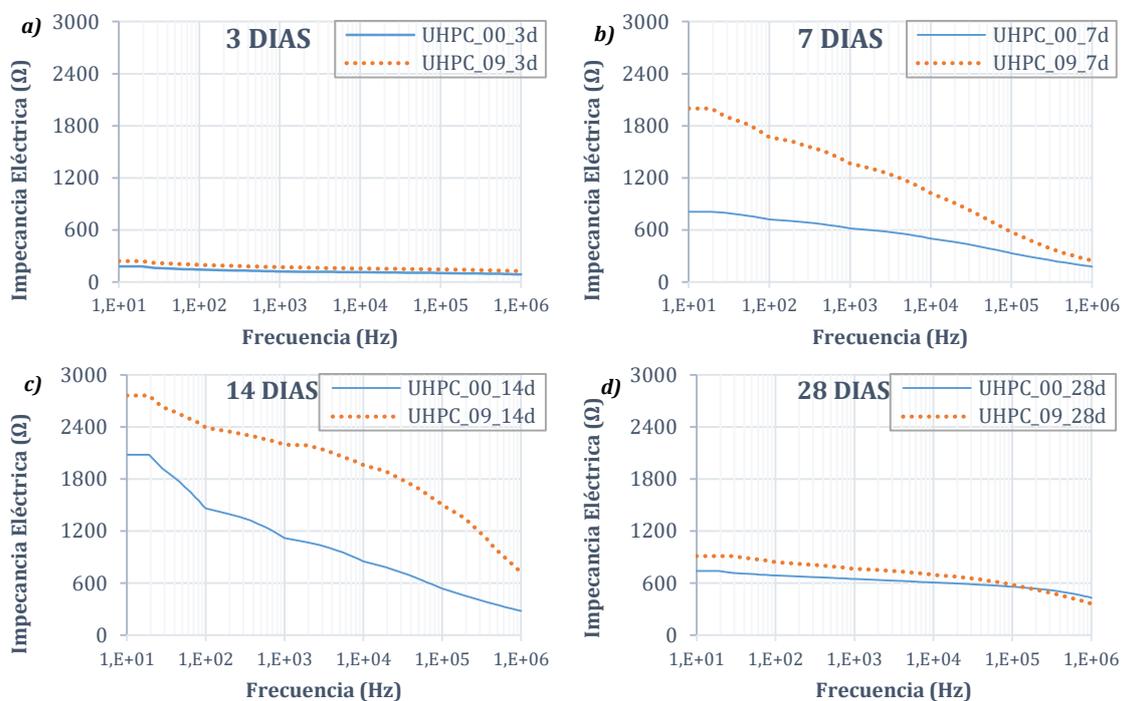


Figura 6.17 – Diagrama de Bode de las muestras correspondientes al UHPC de: 3d de curado a). 7d de curado b). 14d de curado c). 28d de curado d).

Para todas las edades estudiadas (corta edad y mediana edad), se ha observado una tendencia similar en lo que corresponde a las muestras de HC, donde el hormigón con fibras presenta el mayor valor de impedancia para la mayoría de los casos, frente a los resultados sin fibras. Al igual que el HC, se vuelve a apreciar la influencia a partir del fraguado del hormigón, donde es notable visualizar una variación significativa entre el hormigón con fibras y sin fibras en tiempos de 7 y 14 días del curado de hormigón. Para estos resultados se obtienen diferencias porcentuales a frecuencias de 1 kHz de aproximadamente 116 y 104% respectivamente.

Con respecto al aumento de impedancia a partir de la edad de curado del material, en este tipo de medida no se aprecia una tendencia respecto a los valores de impedancia

eléctrica. Tal circunstancia no es reproducible debido a dos factores: *Problemas de escurencia* a partir de la tela absorbente el cual enmascara los resultados y la sensibilidad en la *célula de medida capacitiva*, la cual intuye que el campo eléctrico en esta topología es más intenso y enmascara los resultados producido por el contacto eléctrico.

6.6. CONCLUSIONES

Las medidas de impedancia eléctrica desarrolladas en el presente capítulo permiten evaluar la influencia del contenido de fibras en el hormigón. En este sentido, la matriz de hormigón, los electrodos de colocación y el tiempo de curado del hormigón son las variables que han permitido determinar la presencia o no de las fibras no metálicas. A continuación, se presentan las principales conclusiones que se derivan de este estudio.

- En general, las medidas de impedancia eléctrica a 2w no proporcionan un indicativo claro de la influencia del contenido de fibras en el HRF obtenidos a distintos tiempos de curado (corta y mediana edad). Únicamente en los resultados de HC a mediana edad de curado (28 días), las probetas sin fibras presentan el menor valor de impedancia eléctrica referente los demás resultados.
- La edad de las probetas es fundamental para valorar objetivamente la impedancia de la muestra, así como su presencia y contenido en fibras por métodos basados en la espectroscopia de impedancias. En el caso de las medidas de impedancia eléctrica a 2w y a 4w, el máximo incremento respecto a los valores de impedancia eléctrica se produce mayor tiempo de curado del hormigón. Tal circunstancia se produce como consecuencia de que a mayor tiempo de fraguado los poros tienden a cerrarse a una evolución lenta, dificultado el paso de la corriente eléctrica.
- Los resultados de impedancia eléctrica a partir de la conductividad eléctrica a 4w en el HC, evidencian que a partir de la media edad el hormigón sin fibras presenta un aumento de impedancia eléctrica en comparación al hormigón con fibras. Se presume a que las fibras crean nuevas fases, en especial la fase fibra-cemento, que contribuiría a amplificar el camino de conducción y reducir la impedancia eléctrica. Por el contrario, el UHPC no proporciona un indicativo claro de la influencia del contenido de fibras en el hormigón.
- En el hormigón convencional, las medidas de impedancia eléctrica a larga edad proporcionan una clara revelación de la influencia del contenido de fibra, donde las muestras en estado seco demuestran que a mayor contenido de fibra menos valor de impedancia eléctrica. Por el contrario, el UHPC no proporciona una clara revelación de la influencia del contenido de fibras en el hormigón.
- En todos los casos, las muestras en estado mojado (M) muestran una reducción de las medidas de impedancia eléctrica. Este comportamiento es esperable ya que, al sumergirlas, los poros se rellenan de material conductor, y por ende habría un mayor camino de conducción.
- Los resultados de impedancia eléctrica a partir de la conductividad iónica a 4w presentan los mejores resultados. Tanto para el HC como para el UHPC, las muestras

de larga edad en estado seco (S) proporcionan una clara revelación de la influencia del contenido de fibras. Si bien es necesario profundizar en esta línea de investigación para comprobar la validez de las hipótesis de partida y realizar medidas a partir de campañas experimentales con mayores muestras.

- En lo que respecta a las medidas de impedancia eléctrica mediante la célula de medida capacitiva, los resultados evidencian que el hormigón con fibras presenta, para todos los casos, valores superiores de impedancia eléctrica que el hormigón sin fibras.

7. ESTUDIO DE DURABILIDAD EN MACROFIBRAS SINTÉTICAS

7.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se han abordado aspectos relacionados con la viabilidad estructural de las macrofibras no metálicas para uso en dovelas prefabricadas. Para ello, se han estudiado las propiedades físicas y mecánicas del hormigón reforzado con fibras, asimismo se ha evaluado el control de calidad tanto a edades tempranas como a nivel de emplear nuevos métodos para la determinación del contenido de fibras no metálicas en el hormigón.

La mayoría de las fibras no metálicas estudiadas en los capítulos anteriores ofrecen grandes prestaciones y, además de ser económicas respecto a otras fibras (fibras metálicas), son en general químicamente inertes y muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón. Esto las convierte en una posible solución estructural, permitiendo además una reducción de costes y recursos asociados a la construcción con destacadas mejoras en cuanto a la durabilidad (aumentando la vida útil de la estructura).

Tales ventajas motivan la necesidad de estudiar la durabilidad de las fibras no metálicas, contribuyendo de este modo a abrir el camino definitivo de las macrofibras no metálicas.

7.1.1. Objetivos

El objetivo principal del presente capítulo es verificar la durabilidad de las fibras sintéticas frente a diferentes agentes agresivos. La selección de estas fibras atendió a una serie de requerimientos mecánicos y de durabilidad, detallados en el capítulo 3.

Para ello, se determinan las propiedades mecánicas básicas y se determinan las características físico-químicas superficiales de las fibras. Esta caracterización se realiza tanto para el estado inicial no degradado, como tras someter a los hilos madre a degradación en diferentes ambientes.

7.1.2. Organización del estudio

En el *apartado 7.2* se describe de forma detallada la campaña experimental realizada. Tras ello, se aborda el análisis de los resultados obtenidos en el *apartado 7.3*. Los resultados se organizan presentando primero la evolución de las propiedades mecánicas referente a la resistencia a tracción y módulo de elasticidad. Seguidamente, se analiza la evolución de las propiedades físicas tomando en cuenta la caracterización micro estructural del material (Estudio de Microscopía electrónica de barrido y Estudio de Espectroscopia Raman).

7.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

7.2.1. Plan de trabajo

Este apartado presenta las características de la campaña experimental, realizadas para verificar la durabilidad de las fibras frente a ambientes agresivos. Se presenta los materiales y disoluciones agresivas utilizadas para la realización de los ensayos, tipos, número de muestras a emplear y se describen los diferentes tipos de ensayos empleados, con la finalidad que se pueda abordar el estudio de la durabilidad de las fibras no metálicas. Para ello, se propone una campaña incremental, que permita abordar el estudio de diferentes variables y parámetros sin incrementar de manera exponencial el número de muestras a estudiar. En la *Figura 7.1* se muestra un esquema del planteamiento de la campaña experimental.

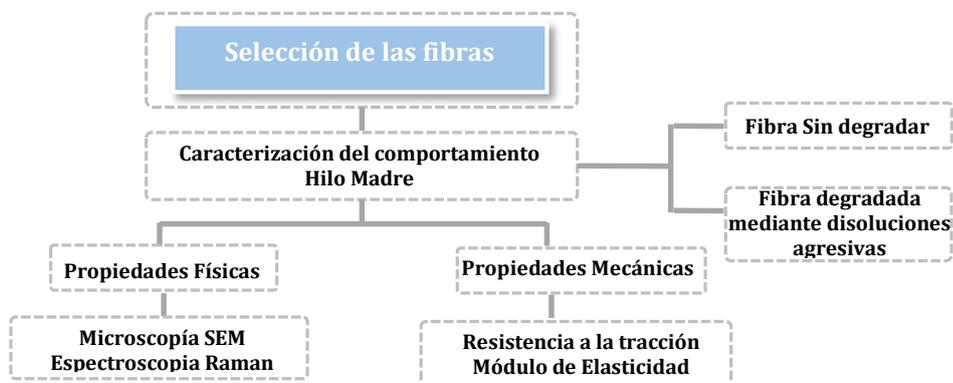


Figura 7.1 – Esquema de planteamiento de la campaña Experimental

La presente campaña experimental determina las características de las fibras a partir del hilo madre de cada una de las fibras seleccionadas (empleadas en el *Capítulo 3*). A partir de la caracterización del comportamiento del hilo madre se obtienen las propiedades mecánicas básicas y se determinan las características físico-químicas superficiales de las fibras. Esta caracterización se realizará tanto para el estado inicial no degradado, como tras someter a los hilos madre a degradación en diferentes ambientes agresivos.

7.2.2. Tipos de fibras seleccionadas

De cara a evaluar la influencia de las fibras en la respuesta de durabilidad, se han seleccionado diferentes tipos de fibras no metálicas (derivadas de la poliolefina), utilizadas en el *capítulo 3* de la presente Tesis Doctoral. La Tabla 7.1 muestra un detalle de las diferentes fibras seleccionadas.

Tabla 7.1 - Fibras seleccionadas

Tipo de fibra	Fibra	Deq. [mm]	Textura	Color
Poliolefina	PP1	0,92	rugosa	Negro
	PP2	0,77	rugosa	Transparente
	PP3	0,44-0,48	lisa	Transparente
	PP4	0,91	rugosa	Transparente
	PP5	0,97	rugosa	Transparente
	PP6	0,75	rugosa	Transparente
	PP8	0,66	lisa	Blanco

Las fibras que presentan mayor disponibilidad en el mercado son las de poliolefina. Las fibras de poliolefina a estudiar, son fundamentalmente de polipropileno. Cada tipo de fibra mostrado en la Tabla 7.1 se ha identificado con el código indicado que será empleado a lo largo del presente capítulo.

7.2.3. Preparación de las fibras

La preparación de las fibras, a partir del hilo madre de esta campaña experimental; tuvo lugar en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC. Estas fibras cortaron con una longitud de 50 cm, utilizando 10 cm en cada extremo para la sujeción de la muestra a la mordaza de la máquina. Los 30 cm restantes serán los expuestos a las disoluciones agresivas.

7.2.4. Disoluciones agresivas empleadas

Con la finalidad de estudiar la durabilidad de las fibras frente a ambientes agresivos, se han planteado someterlas a siete diferentes tipos de disoluciones agresivas (sales, ácidos y básico). La Tabla 7.2 se detalla los diferentes ambientes que se han de utilizar para evaluar la durabilidad de las diferentes fibras no metálicas.

Los ataques químicos mediante el empleo de sales corresponden a medios agresivos basados en Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Magnesio (MgSO₄) y Sulfato de Sodio (NaSO₄). El cloruro sódico y sulfato de sodio consta de una pureza del $\geq 99,8\%$ y $\geq 99,0\%$ respectivamente. El sulfato de magnesio cuenta con una pureza del 98%.

Tabla 7.2 - Disoluciones agresivas empleadas en las fibras

Tipo de ataque Químico	Medio	Concentración	Nomenclatura	Temperatura	Duración
Sales	Cloruros	3%	NaCl	20 °C	1-60 d
	Magnesio	5%	MgSO ₄	20 °C	
	Sulfatos	5%	NaSO ₄	20 °C	
Ácidos	Clorhídrico	10%	HCl	20 °C	
	Sulfúrico	5%	H ₂ SO ₄	20 °C	
	Acético	5%	CH ₃ COOH	20 °C	
Básico	Álcalis	1M	NaOH	40 °C	

Las disoluciones ácidas se pueden diferenciar en dos tipos según la naturaleza del ácido: ácidos minerales (ácido clorhídrico HCl y ácido sulfúrico H₂SO₄) y ácido orgánico (acético CH₃COOH). Los ácidos clorhídrico y sulfúrico tienen purzas del 37% y 99%, respectivamente; mientras que el ácido orgánico, tiene una pureza del 99,5%.

Para el ataque químico básico se ha utilizado hidróxido de sodio (sosa cáustica NaOH) con una pureza del >98%. El ataque químico con hidróxido de sodio (NaOH) corresponde a la única disolución agresiva empleada a una temperatura en horno de 40 °C. Cabe señalar que esta concentración y temperatura se consideran habituales para dicha representación reportado en la literatura técnica (Sim, Park, & Moon, 2005) y la normativa (RILEM/TC-ACS/11/27, 2011).

Todas las disoluciones agresivas expuestas se han de utilizar para la simulación en laboratorio de los ataques externos por (sales, ácidos y básico) hacia las fibras, donde cada medio de ataque es preparado con una disolución en las concentraciones especificadas en la Tabla 7.2.

Duración de la degradación de las fibras

La duración del ataque químico mediante las disoluciones agresivas empleadas en las muestras (hilo madre) se ha establecido tiempos de 1 a 60 días. Según estudios de la literatura técnica, con un máximo de 60 días de ataque, sería más que suficiente determinar la evaluación de la durabilidad. Para este estudio se establecen tiempos de: 1, 3, 5, 7, 15, 30 y 60 días de degradación.

7.2.5. Configuración del ensayo

En primer lugar, a partir del hilo madre se deberán cortar las muestras a 50 cm de longitud, tal y como expone el apartado 7.2.3. Simultáneamente, se preparan los recipientes donde se situarán las disoluciones y fibras.

a) Preparación del recipiente

Se dispone un recipiente por cada tipo de disolución agresiva y tipo de fibra. Dentro del recipiente, se han de separar las fibras con rejillas (Figura 7.2); con la finalidad de garantizar que la fibra no se agite y los 30 cm de las fibras a atacar, siempre estén en contacto con la disolución (totalmente húmedo).

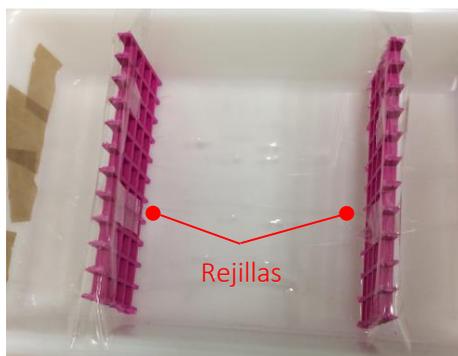


Figura 7.2 – Preparación de las bandejas o recipientes.

b) Preparación de las disoluciones agresivas

La preparación de las disoluciones agresivas se realiza según las concentraciones indicadas en la Tabla 7.2. Por cuestiones de seguridad, la preparación de todas las disoluciones agresivas fueron elaboradas en los Laboratorios del B1 del Campus Nord de la UPC, dentro de la campana de gases (Figura 7.3a), con la finalidad de limitar la exposición de humos y vapores de las disoluciones.

En lo que sigue se muestra el orden de la preparación de las disoluciones, así como los tiempos. 1º) Se pesa cada tipo de medio químico en una balanza de alta precisión (Figura 7.3b), 2º) Se coloca el ataque en un vaso precipitado dentro de la campana, 3º) El vaso precipitado se coloca sobre un dispositivo de agitación magnética (Figura 7.3c), 4º) Sin detener el agitador magnético, se añade agua destilada (entre 800 y 900 ml), teniendo en cuenta que se deja un mínimo de 100 ml para fusionarlo posteriormente, mezclándolo durante aproximadamente 20 minutos, 5º) la disolución se introduce a un matraz aforado junto al agua destilada faltante, finalizando el proceso con una agitación manual.



Figura 7.3 – Campana de gases de la UPC a). Balanza b). Dispositivo de agitación magnética c).

Cada disolución agresiva se debe mezclar mediante un dispositivo de agitador magnético en combinación con una agitación mecánica. De este modo, generando un vórtice en las disoluciones, se asegura que toda la superficie de las fibras se ataca de manera uniforme.

c) Preparación de las disoluciones agresivas en las fibras

El proceso de preparación de las disoluciones agresivas en las fibras, se rigió en el mismo modo para todas.

- Se colocan las fibras con las disoluciones agresivas en las bandejas, cada bandeja contiene 1000 ml de disolución. Los ataques químicos por sales (Figura 7.4a) se realizaron en la Cámara climática del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC, los ataques químicos por ácidos (Figura 7.4b) se realizaron en la campana de gases del Laboratorio B1 del Campus Nord de la UPC y el ataque químico básico (Figura 7.4c) en el horno del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC.

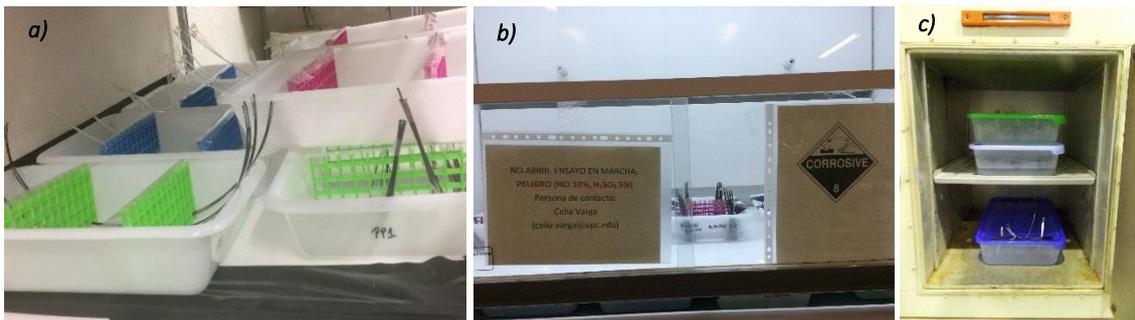


Figura 7.4 –Ataques químicos por Sales en cámara climática a), Ataques químicos por ácidos en campana de gases b), Ataque químico base en horno 40°C c).

- Por cada día de ataque químico programado se deberán retirar de las bandejas a: 1, 3, 5, 7, 15, 30 y 60 días de ataque.
- Al retirarlas, las muestras se sumergen en agua, para evitar que continúe el ataque y/o contaminación.
- Se secan las muestras con papel absorbente.
- Las muestras se guardan en un film transparente, para evitar su contaminación y se especifica según el tipo, el ataque y los días en que han estado expuesto a la condición ambiental (Figura 7.5).

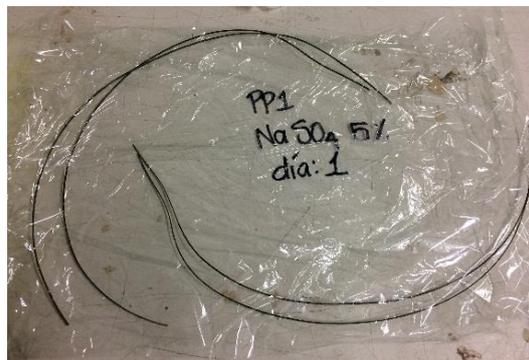


Figura 7.5 – Muestra guardada posteriormente al primer día de degradación.

La figura antes citada, exhibe un ejemplo del proceso final del ataque en la muestra, en este caso la muestra corresponde a la fibra PP1, en el primer día del ataque NaSO_4 .

7.2.6. Determinación de la resistencia a tracción y módulo elástico

La preparación de la muestra para el ensayo de la resistencia a tracción y módulo de elasticidad; tuvo lugar en el Laboratorio de la Innovación tecnológica de Estructuras y Materiales, del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras de la Ingeniería, de la UPC Terrassa.

El ensayo se realiza en la máquina electromecánica marca MTS modelo Insight con una capacidad de 10kN. Este método de ensayo de tracción desarrollado para caracterizar las propiedades mecánicas de las macrofibras tomó como referencia las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 13934-1:2013, que describe el método estandarizado general para evaluar la resistencia a la tracción de diferentes tipos de fibras.

a) Configuración del ensayo

Para este estudio se han tomado en consideración dos tipos de sistema de fijación que minimizan el error en fallo por deslizamiento, en función al tipo de fibra a ensayar. En el caso de las fibras **PP1**, **PP2**, **PP3** y **PP8** se ha empleado un sistema de sujeción mediante fibra de vidrio adherida a la muestra, mientras que en el caso de las fibras **PP4**, **PP5** y **PP6** se ha empleado un sistema de sujeción mediante a láminas de aluminio. Ambos métodos se describen a continuación:

Método de sujeción mediante fibras de vidrio

- En primer lugar, para evitar la posibilidad de la adherencia entre la fibra y el molde de vidrio, se limpia la superficie con acetona y se humedece con dos desencofrantes.
- Con la finalidad de consolidar los extremos de las fibras, se colocan sobre ellas una base de fibra de vidrio, y se deja curar durante las primeras 24 horas (Figura 7.6a). Esta fibra de vidrio es adherida a la fibra mediante resina epóxica. La Figura 7.6b muestra la apariencia del resultado de esta fase. La medida de la fibra de vidrio es de 2,0 cm de ancho por 4,2 cm de longitud.

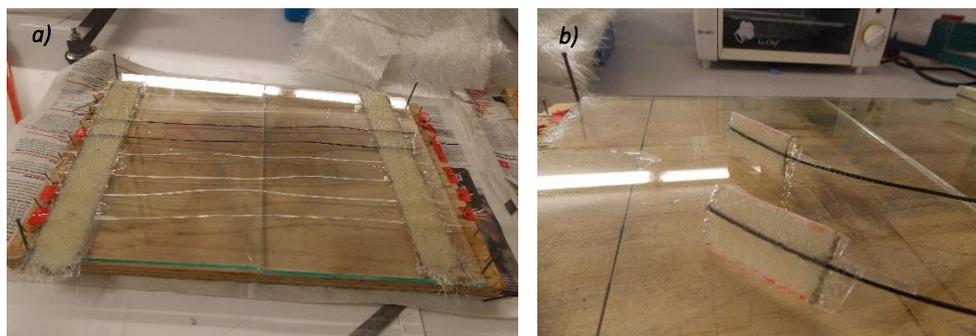


Figura 7.6 – Colocación de la fibra de vidrio sobre las fibras a). Fibra de vidrio adherida a la muestra en el extremo b).

Método de sujeción mediante láminas de aluminio

- En primera instancia, para evitar la adherencia entre la fibra y el molde de madera a utilizar, se coloca un papel de hornear bajo la lámina de aluminio a emplear. Tras

ello, coloca en los extremos de cada cara de la fibra una lámina de aluminio, con una longitud de anclaje de 4 cm.

- Previo a la adherencia de las fibras con las láminas de aluminio, con la finalidad de garantizar una sujeción satisfactoria se han de colocar en los extremos de las fibras unos clavos de 1,3 x 18 mm. En el centro de las fibras, se coloca una cinta adhesiva reforzada para sujetarlas (Figura 7.7). Estas láminas de aluminio se adhieren a la fibra mediante una resina epoxi estructural bicomponente.
- Una vez impregnados los extremos de las fibras con la resina se coloca la lámina de aluminio superior; y, sobre ésta papel de hornear. Posteriormente, se coloca un peso que ayude al asentamiento de la lámina.

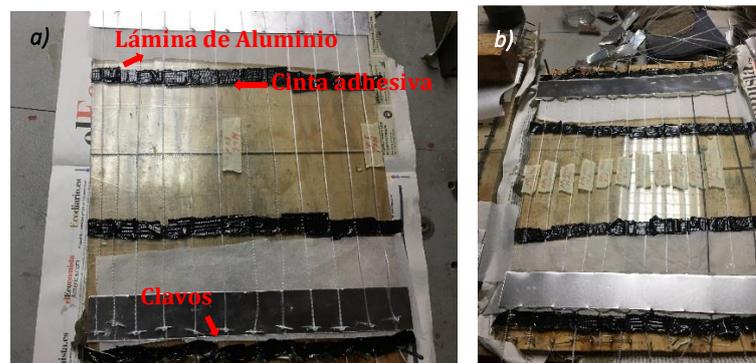


Figura 7.7 – Colocación de las láminas de aluminio sobre las fibras a). Lámina de vidrio adherida a la muestra en los extremos b).

Una vez que estas dos primeras operaciones están realizadas, se procede a la prueba de la máquina, mediante los pasos se muestran a continuación:

- Se coloca el extensómetro en el centro de la fibra (Figura 7.8), teniendo en cuenta una abertura inicial de 50 mm. En cada mordaza del extensómetro se coloca una goma elástica para evitar deslizamientos y daños en el hilo madre.

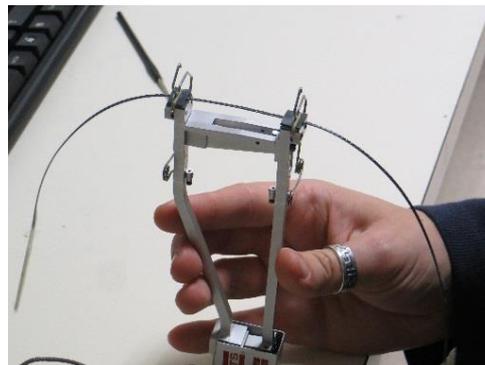


Figura 7.8 – Colocación del extensómetro en el centro de la fibra

- Se colocan los extremos de la fibra en la máquina de ensayo electromecánica marca MTS modelo Insight con una capacidad de 10kN, y sujetarla con las mordazas.

- Se selecciona la velocidad de ensayo de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 13934-1:2013, que considera una velocidad de 9 mm/min controlado por el desplazamiento del pistón.

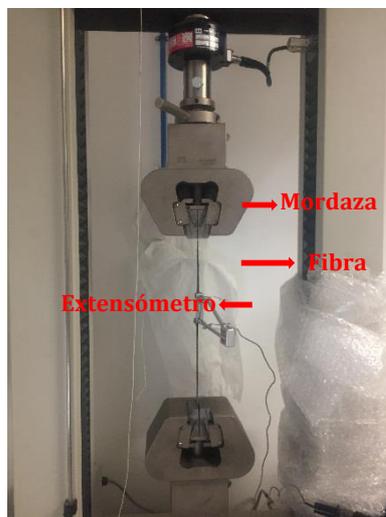


Figura 7.9 – Configuración del ensayo

7.2.7. Determinación de la microscopía electrónica de Barrido (SEM)

La determinación de la microscopía electrónica de barrido se ha llevado a cabo en los Servicios Científico Técnico de la Universidad de Barcelona UB. Para la obtención de las imágenes se utiliza un equipo de microscopía Jeol JSM-840 (Figura 7.10a). Previamente a su análisis por SEM, las muestras deben ser tratadas con plata para obtener una mejor calidad de imagen en las micrografías (Figura 7.10b). Tras ello, las muestras se almacenan en un vial totalmente cerrado para evitar contaminación. Se utilizaron trozos atacados de fibras en menos de 1 cm de largo.

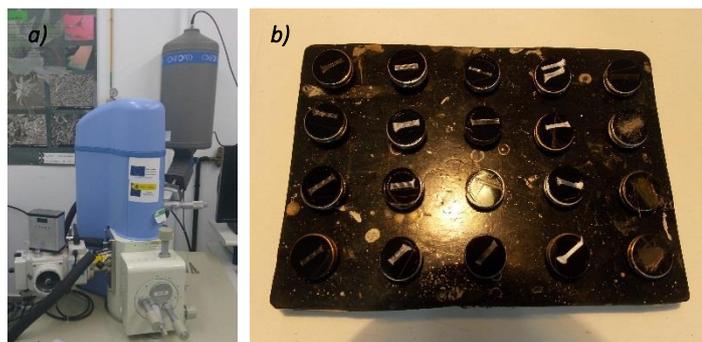


Figura 7.10 – Equipo de microscopía a utilizar a). Muestras listas para ser tratadas con plata b).

7.2.8. Determinación de la espectroscopia Raman

El análisis del espectro Raman se ha de realizar antes y después de los 60 días de exposición a las disoluciones agresivas, tomando en cuenta 1 cm de la muestra. Para esta campaña experimental, se utilizará un equipo confocal Renishaw Invia equipado con un microscopio Leica. Los espectros se registrarán con un láser de diodo de Nd:YAG de 532

nm. Las medidas se han de realizar con una potencia de salida del láser de 5mW, un tiempo de adquisición de 10 segundos, y 5 acumulaciones para mejorar la relación señal/ruido. Las frecuencias se calibrarán con la banda de ± 520.6 nm del silicio.

7.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.3.1. Resistencia a tracción

En este apartado, se analizan los resultados de la evolución de las propiedades mecánicas de las fibras. Las fibras analizadas para el estudio corresponden a las fibras derivadas de la poliolefina: **PP1, PP2, PP3, PP4, PP5, PP6** y **PP8**.

Los resultados del ensayo de resistencia a tracción se muestran en la Tabla 7.3. En ella se presentan los valores medios de las tensiones últimas alcanzadas por cada muestra de hilo madre sin atacar, junto con los datos suministrados por los fabricantes. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de la tensión última para cada tipo de fibra.

Tabla 7.3 – Valores de la tensión última suministrados por los fabricantes y de las diferentes muestras ensayadas en el laboratorio.

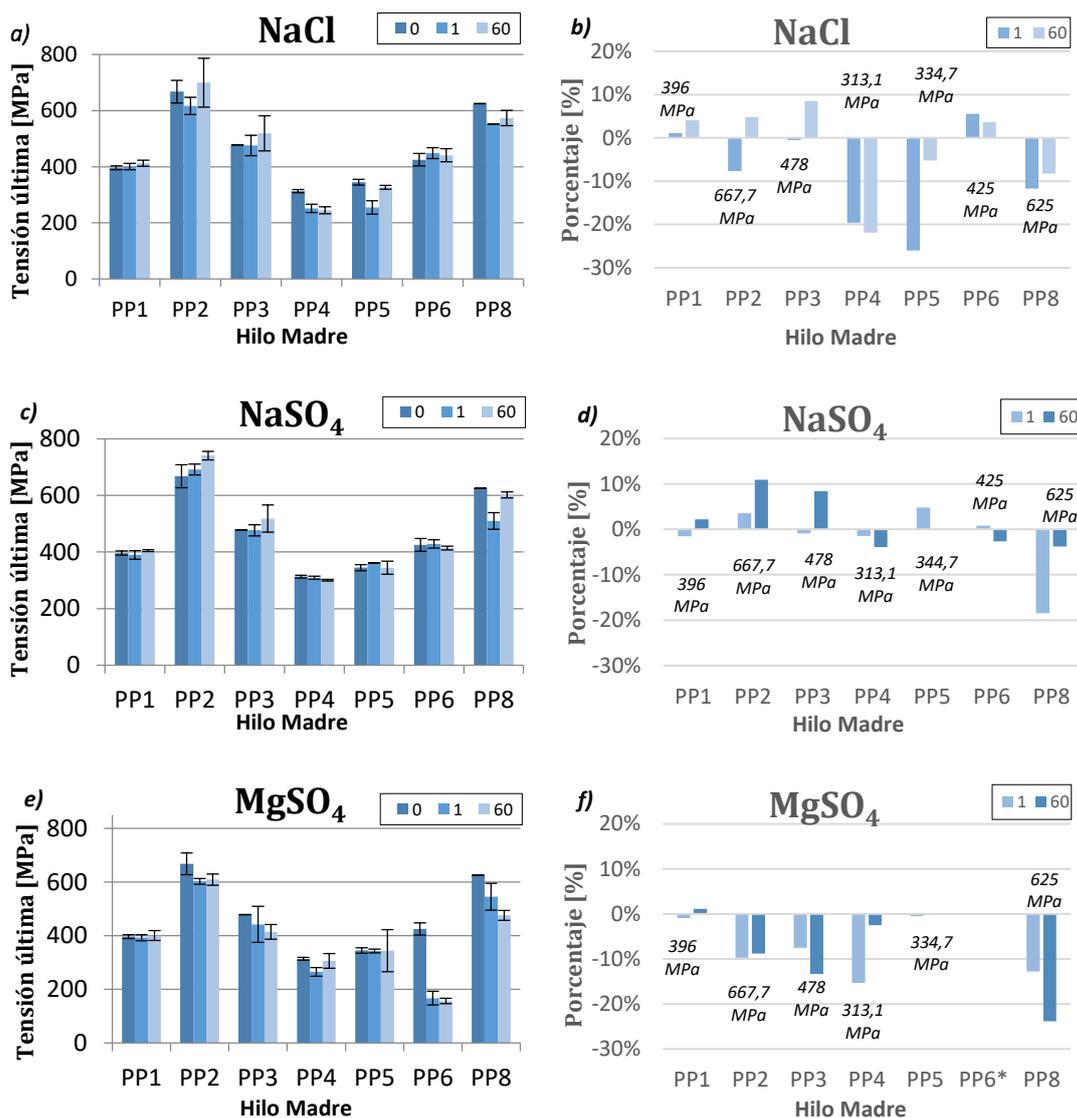
Hilo Madre	Tensión última (σ_{ULT})			Datos suministrados por fabricante
	(σ_{ULT}) [MPa]	DE [MPa]	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]
PP1	396	7,3	1,8	560
PP2	667,7	40,3	6	550
PP3	478	-	-	613
PP4	313,1	5,4	1,7	640
PP5	344,7	10,4	3	640
PP6	425	22,5	5,3	448
PP8	625	-	-	600-650

Los resultados correspondientes a las muestras ensayadas en laboratorio, presentan tensiones últimas menores que las tensiones suministradas por los fabricantes, de hasta un 104% inferior como el caso de la muestra (PP4). En el lado opuesto, la fibra (PP2) presenta un aumento de tensión última de un 17% respecto a los datos suministrados por los fabricantes.

Con lo que respecta a las muestras ensayadas en nuestro laboratorio, se aprecian tres tendencias de comportamiento, en función del valor de resistencia a tracción. Las fibras que mayor resistencia a tracción presentan corresponden a las fibras PP2 y PP8, con un valor de 667 y 625 MPa respectivamente. En un grupo intermedio se encuentran las fibras PP1, PP3 y PP6, con valores de resistencia a tracción de 396, 478 y 425 MPa respectivamente. Finalmente, las fibras correspondientes a las muestras PP4 y PP5 presentan menores valores de resistencia a tracción, encontrándose en valores de 313 y 344 MPa respectivamente.

Asimismo, se observa que para cada una de las muestras de hilo madre ensayada, los coeficientes de variación no exceden el 10%, por lo que se puede catalogar como un ensayo adecuado para el control sistemático del ensayo a tracción, permitiendo obtener valores representativos del mismo.

Tomando en cuenta los resultados de la tensión última de las muestras sin atacar, la Figura 7.11 presenta los resultados de cada fibra sometidas a las disoluciones agresivas por sales: Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Magnesio (MgSO₄) y Sulfato de Sodio (NaSO₄), a edades de 0, 1 y 60 días.



(*) Resultados descartados por relación espuria.

Figura 7.11 – Tensión última de las fibras sometidas a las disoluciones agresivas por sales: Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Sodio (NaSO₄), y Sulfato de Magnesio (MgSO₄) a edades de 0, 1 y 60 días.

Con respecto a la tensión última frente a los medios de sales en tiempos de ataque de 0, 1 y 60 días, se aprecia que las diferentes muestras se diferencian en tres grupos:

variaciones porcentuales menores al $\pm 10\%$, variaciones porcentuales entre $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ y variaciones porcentuales $> \pm 20\%$.

En primer lugar, se analizan los resultados de la tensión última frente a la disolución agresiva de sal por Cloruro de Sodio. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.11a y b. Con respecto a estos resultados, las muestras del primer grupo corresponden a la menor variación porcentual (PP1, PP2, PP3 y PP6).

Estos porcentajes en la variación de tensiones ante la muestra sin atacar, ponen de manifiesto que, no se aprecian influencias de degradación en la muestra, catalogando esta variación como porcentajes dentro del margen del error del ensayo. En el segundo grupo correspondiente a la muestra PP8 se aprecia una disminución de la tensión última de un 12% al cabo de 1 día de degradación. Finalmente, el tercer grupo, correspondiente a la muestra PP4 y PP5, muestran una disminución de la tensión mayor del 20%.

En segundo lugar, se analizan los resultados de la tensión última frente a la disolución agresiva de sal por Sulfato de Sodio. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.11c y d.

Con respecto a estos resultados, no se aprecian influencias en función a los tiempos de ataque de la muestra, obteniendo variaciones porcentuales inferiores al $\pm 12\%$. No obstante, la muestra correspondiente a PP8, proporciona a una variación porcentual del segundo grupo, con una disminución de la tensión de un 18% al cabo de 1 día de degradación.

En último lugar, se analizan los resultados de la tensión última frente a disolución agresiva de sal por Sulfato de Magnesio. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.11e y f.

Con respecto a estos resultados, las muestras del primer grupo correspondientes a la menor variación porcentual $< \pm 10\%$, presentaron las fibras PP1, PP2 y PP5. En el segundo grupo corresponde a las muestras PP3 y PP4 mostraron una disminución de la tensión última de un 15%. Finalmente, el tercer grupo correspondiente a la muestra PP8 presenta una disminución de la tensión del 13% al cabo de 1 día de ataque, mientras que se produjo una disminución del 24% a los 60 días de ataque.

Los resultados del ensayo de resistencia a tracción se muestran en las Tablas 7.4, 7.5 y 7.6. En ellas presentan los valores medios de las tensiones últimas correspondientes a las disoluciones agresivas por sales, alcanzadas por cada muestra de hilo madre, comprendido en un período de ataque químico de 1 y 60 días. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de fibra.

Tabla 7.4 – Tensión última de las fibras sometidas a cloruro de sodio [NaCl]

Ataque por Cloruro de Sodio [NaCl]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	400,5	11,4	2,8	412,1	10,7	2,6
PP2	616,9	30,3	4,9	699,7	87	12,4
PP3	475,7	36,9	7,8	518,7	62,7	12,1
PP4	251,7	14,4	5,7	244,6	12,7	5,2
PP5	255	24,3	9,5	326,7	6,7	2
PP6	448,5	19	4,2	440,5	23,4	5,3
PP8	551,8	0	0	573,6	27,2	2,4

Tabla 7.5 – Tensión última de las fibras sometidas a Sulfato de Sodio [NaSO₄]

Ataque por Sulfato de Sodio [NaSO ₄]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	389,8	15,4	4	404,8	3,4	0,8
PP2	691,1	19	19	740,5	14,9	2
PP3	476,5	19,8	4,2	518	48,1	9,3
PP4	308,6	5,6	1,8	300,9	2,8	0,9
PP5	361,2	-	-	344,2	23,4	6,8
PP6	428,2	14,9	3,5	413,6	6,9	1,7
PP8	509,6	28,9	5,7	601,5	10,3	1,7

Tabla 7.6 – Tensión última de las fibras sometidas a Sulfato de Magnesio [MgSO₄]

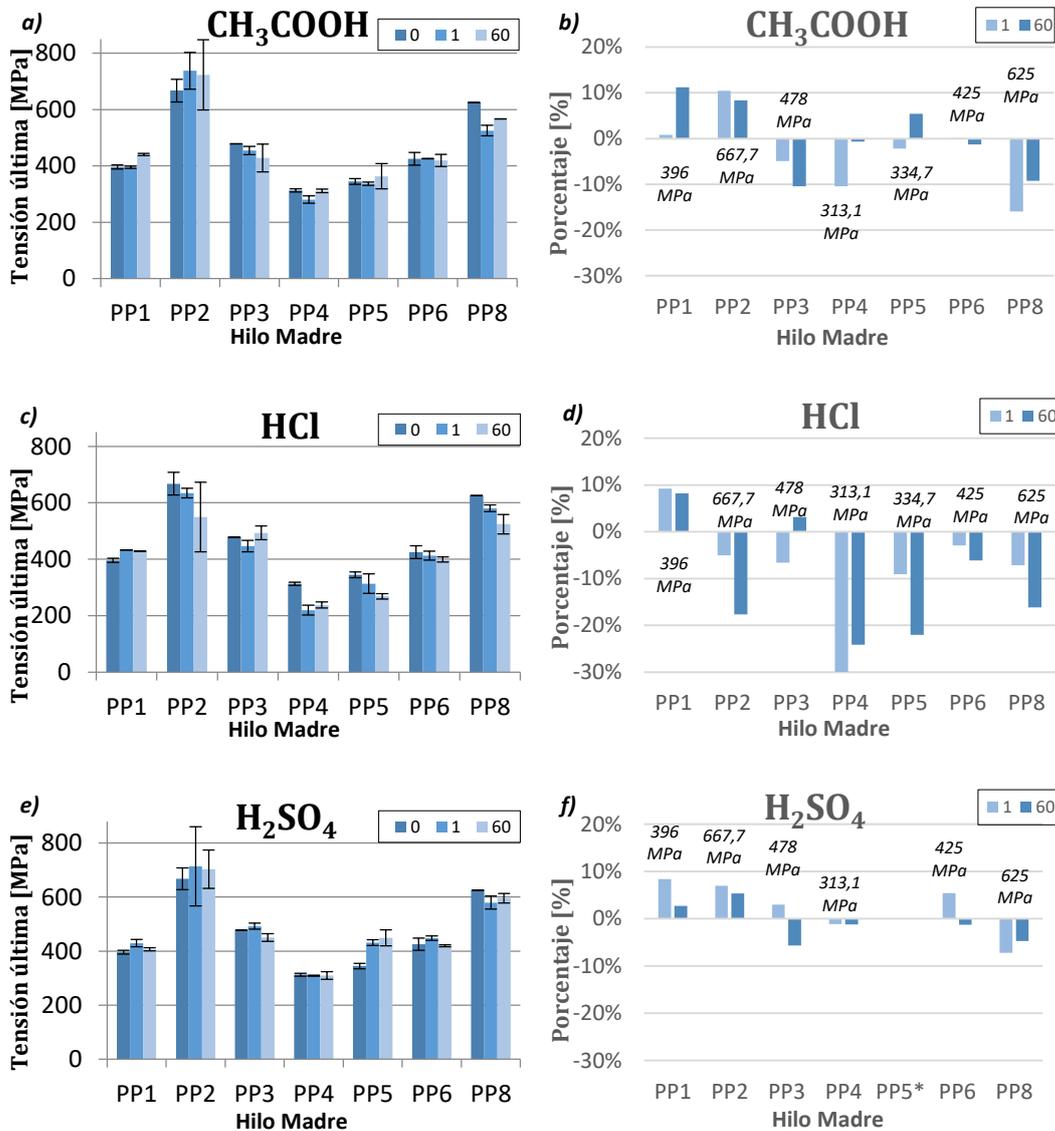
Ataque por Sulfato de Magnesio [MgSO ₄]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	396	11,1	2,8	400,5	18,7	4,7
PP2	667,7	10,3	1,7	609,1	20,5	3,4
PP3	478	67,6	15,3	414,1	27,4	6,6
PP4	313,1	16	6	305,4	27,4	6,6
PP5	344,7	6,9	2	344,3	78,7	22,8
PP6	425	22,5	15,3	156,2	10,3	6,6
PP8	625	50,3	9,2	475,9	18,5	3,9

Los ensayos a tracción correspondientes a 1 día de ataque, presentan tensiones últimas con valores representativos, con un coeficiente de variación inferior al 15%, valor que es considerablemente válido, tras ser alcanzados con otras metodologías experimentales (Cáceres *et al.*, 2016). Por otro lado, las tensiones correspondientes a 60 días presentan con un coeficiente de variación medio inferior al 12%, exceptuando la muestra correspondiente a la fibra PP5, a diferencia del ataque de sal por Sulfato de Magnesio, con un CV% de 22,8%, siendo este la mayor dispersión frente a los ataques por sales.

Tomando en cuenta los resultados de la tensión última de las muestras sin atacar, la Figura 7.12 presenta los resultados de cada fibra sometida a las disoluciones agresivas en

ácidos: Orgánico; Acético (CH_3COOH), y ácidos minerales; ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) a edades de 0, 1 y 60 días.

Con referencia a la tensión última frente a los ataques ácidos en tiempos de ataques de 0, 1 y 60 días, se aprecia que las diferentes muestras se diferencian en tres grupos: variaciones porcentuales menores al $\pm 10\%$, variaciones porcentuales entre $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ y variaciones porcentuales $> \pm 20\%$.



(*) Resultados descartados por relación espuria

Figura 7.12 – Tensión última de las fibras sometidas a los ataques por ácidos: Orgánico (Acético CH_3COOH), y ácidos minerales (ácido clorhídrico HCl y ácido sulfúrico H_2SO_4) a edades de 0, 1 y 60 días.

A continuación, se analizan los resultados de la tensión última frente a la disolución agresiva Orgánico por ácido Acético. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.12a y b.

Con respecto a estos resultados, no se aprecian influencias en función a la degradación de la muestra tras 60 días, obteniendo variaciones porcentuales inferiores al $\pm 10\%$, exceptuando la muestra correspondiente a PP8, que proporciona a una variación porcentual del segundo grupo con una disminución de la tensión de un 16% al cabo de 1 día de ataque. Aunque en el caso de la muestra PP8 la tensión última a 1 día de ataque es superior a la de 60 días, no se tomará en consideración ya que es catalogado como un porcentaje dentro del margen de error del ensayo.

En segundo lugar, se analizan los resultados de la tensión última frente a la disolución agresiva mineral por Ácido Clorhídrico. Con respecto a estos resultados, las muestras del primer grupo correspondientes a la menor variación porcentual a 60 días de ataque ($<\pm 10\%$), presentan las fibras (PP1, PP3 y PP6). En el segundo grupo corresponde a las muestras (PP2 y PP8) con una disminución de la tensión última de un 18% y un 16% respectivamente. Finalmente, en el tercer grupo corresponde a las muestras (PP4 y PP5) con una disminución de la tensión tras 60 días de ataque del 24% y 22% respectivamente.

En último lugar, se analizan los resultados de la tensión última frente a la disolución agresiva mineral por Ácido Sulfúrico. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.12e y f. Con respecto a estos resultados, no se aprecian influencias en función a la degradación de la muestra tras 60 días, obteniendo variaciones porcentuales inferiores al $\pm 10\%$.

Los resultados del ensayo de resistencia a tracción se muestran en la Tabla 7.7 a la 7.9. En ella presentan los valores medios de las tensiones últimas correspondientes al ataque por sales, alcanzadas por cada muestra de hilo madre, comprendido en un período de degradación de 1 y 60 días. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de fibra.

Tabla 7.7 – Tensión última de las fibras sometidas a ácido Acético [CH_3COOH]

Ataque por ácido Acético [CH_3COOH]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	395,1	3,6	0,9	440,4	3,6	0,8
PP2	737,6	65,3	8,9	723,4	124,5	17,2
PP3	454,6	14,6	3,2	428,1	49,8	11,6
PP4	280,5	13,4	4,8	311	6	1,9
PP5	337,1	5,7	1,7	363,4	44,9	12,4
PP6	425,6	0,5	0,1	419,5	21,9	5,2
PP8	525,4	18,5	3,5	567,3	0	0

Tabla 7.8 – Tensión última de las fibras sometidas a ácido Clorhídrico [HCl]

Ataque por Ácido Clorhídrico [HCl]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	432,6	-	-	428,5	0,6	0,1
PP2	634,2	17,4	2,7	549,7	123,3	22,4
PP3	446,5	20,3	4,5	493,2	24,5	5
PP4	219,4	17,5	8	237,6	10,5	4,4
PP5	313,6	35	11,2	268,7	9,5	3,5
PP6	412,6	15,7	3,8	399	8,9	2,2
PP8	580,4	11,6	2	524,2	34,7	6,6

Tabla 7.9 – Tensión última de las fibras sometidas ácido Sulfúrico [H₂SO₄]

Ataque por Ácido Sulfúrico [H ₂ SO ₄]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	429,2	13,6	3,2	406,7	6,2	1,5
PP2	714,1	146,8	20,6	703,3	71,5	10,2
PP3	492,2	10,9	0,5	450,9	14,2	4,6
PP4	309,5	1,6	0,5	309,3	14,2	4,6
PP5	431,5	10,7	2,5	448,7	29,5	6,6
PP6	448,1	8	1,8	419,5	3,9	0,9
PP8	579,7	24,6	4,2	595,6	17,7	3

En el caso de los ensayos a tracción correspondientes a 1 día de ataque, presentan tensiones últimas con valores representativos con coeficientes de variación inferior al 11%, exceptuando la muestra correspondiente a la fibra PP2 frente al ataque por ácido sulfúrico, con un CV de 20,6%. Por otro lado, las tensiones correspondientes a 60 días presentan un coeficiente de variación medio inferior al 10%, exceptuando las muestras correspondientes a la fibra (PP5), frente a la disolución agresiva por ácido acético y la fibra (PP2) frente a la disolución agresiva por ácido Clorhídrico con un CV% entre 10% y 20%. Tomando en cuenta los resultados de la tensión última de las muestras sin atacar, la Figura 7.13 presenta los resultados de cada fibra sometidas al medio básico por hidróxido de Sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.

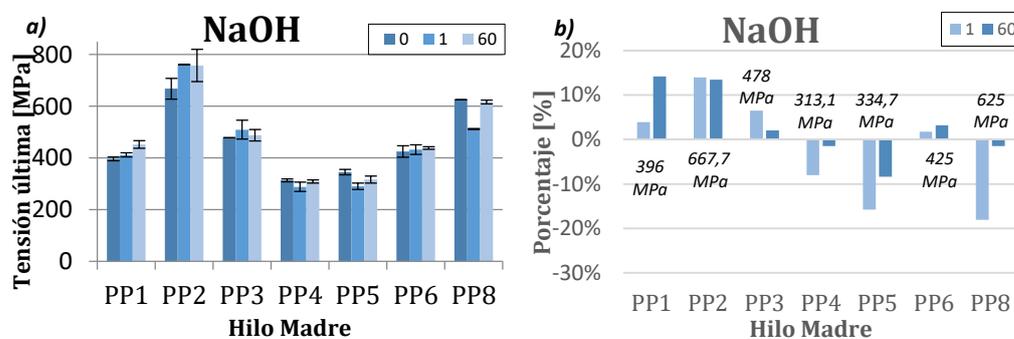


Figura 7.13 – Tensión última de las fibras sometida al ataque básico: Hidróxido de sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.

A continuación, se analizan los resultados de la tensión última frente a la disolución agresiva básica por Cloruro de Sodio. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.13a y b. Con respecto a estos resultados, las muestras del primer grupo correspondientes a la menor variación porcentual inferiores al $\pm 10\%$, presentan las fibras (PP3, PP4 y PP6). En el segundo grupo corresponde a las muestras (PP1, PP2, PP5 y PP8), proporcionando una variación porcentual de la tensión última entre $\pm 10\%$ y el $\pm 20\%$.

Dicho lo anterior, estas diferencias porcentuales a pesar de parecer considerables, pierden importancia cuando se analiza la variación porcentual en función a 1 día de ataque; donde en el peor de los casos, la muestra (PP8) presenta la mayor disminución de tensión con un 18%, mientras que a los 60 días de ataque un 1% (ambas respecto a la muestra sin atacar). Así, estos porcentajes en las tensiones ponen de manifiesto que, no son característicos para catalogar una degradación en las muestras sometidas al ataque por hidróxido de sodio.

Los resultados del ensayo de resistencia a tracción se muestran en la Tabla 7.10. En ella presentan los valores medios de las tensiones últimas correspondientes al ataque básico por hidróxido de sodio, alcanzadas por cada muestra de hilo madre

Tabla 7.10 – Tensión última de las fibras sometidas a Hidróxido de sodio [NaOH]

Ataque por Hidróxido de sodio NaOH]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%	(σ_{ULT}) [MPa]	DT	CV%
PP1	411,4	7,9	1,9	452,1	14,9	3,4
PP2	760,8	0	0	757,3	62,4	8,2
PP3	509	36,6	7,2	487,7	22,1	4,5
PP4	288	17,7	6,1	308,5	6	1,9
PP5	290,2	12,2	4,2	315,7	13,6	4,3
PP6	432,4	18,5	4,3	438,4	5,3	1,2
PP8	512,2	1,8	0,3	615,9	7,6	1,2

Con respecto a los ensayos a tracción correspondientes a la disolución agresiva por hidróxido de sodio, presentan tensiones últimas con valores representativos, con coeficientes de variación inferior al 8,2% para todas las muestras, tanto para 1 día de ataque como para 60 días de ataque.

7.3.2. Módulo de Elasticidad

Las fibras analizadas en este estudio corresponden a las fibras derivadas de la poliolefina: **PP1, PP2, PP3, PP4, PP5, PP6** y **PP8**. Los resultados del ensayo del módulo de elasticidad se muestran en la Tabla 7.11. En ella presenta los valores medios del módulo de elasticidad por cada muestra de hilo madre sin atacar, junto con los datos suministrados por los fabricantes. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de fibra.

Los resultados correspondientes a las muestras ensayadas en laboratorio, por lo general, presentan módulos de elasticidad menores que los módulos de elasticidad suministrados por los fabricantes. Tales disminuciones son de hasta un 269% inferior como el caso de la muestra PP1; exceptuando las fibras correspondientes a la PP3 y PP6, que

presentan un aumento de módulo de elasticidad, en función a los datos suministrados por los fabricantes de un 8% y 36% respectivamente.

Según la citada tabla, los resultados de módulo de elasticidad presentan un comportamiento análogo a los ensayos de compresión. Con lo que respecta a las muestras ensayadas en laboratorio, se aprecian las mismas tendencias de comportamiento. Las fibras que presentan un mayor módulo de elasticidad corresponden a las fibras PP2 y PP8, con un valor de 9379 y 6120 MPa respectivamente.

En un grupo intermedio encontramos las fibras PP1, PP3 y PP6, con valores de módulos de elasticidad de 5559, 5875 y 5685 MPa respectivamente. Finalmente, las fibras correspondientes a las muestras PP4 y PP5 presentan menores valores de módulos de elasticidad, encontrándose en valores de 4283 y 5183 MPa respectivamente.

Tabla 7.11 – Valores de los módulos de elasticidad suministrados por los fabricantes y de las diferentes muestras ensayadas en el laboratorio.

Módulos de Elasticidad (E)				Datos suministrados por fabricante
Hilo Madre	(E) [MPa]	DT [MPa]	CV%	(E) [MPa]
PP1	5559,3	90,2	1,6	20500
PP2	9379	869	9,3	-
PP3	5875	419	7,1	5400
PP4	4283,9	16,8	0,4	10000
PP5	5183,6	555,6	10,7	12000
PP6	5685	18,2	0,3	3640
PP8	6120	-	-	9500

Asimismo, se observa que para cada una de las muestras de hilo madre ensayada, los coeficientes de variación no excede el 11%, donde se puede catalogar como un ensayo adecuado para el control sistemático del módulo de elasticidad, permitiéndonos obtener valores representativos del mismo.

Tomando en cuenta los resultados del módulo de elasticidad de las muestras sin atacar, la Figura 7.14 presenta los resultados de cada fibra sometidas a la disoluciones agresivas por sales: Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Magnesio (MgSO₄) y Sulfato de Sodio (NaSO₄), a edades de 0, 1 y 60 días.

Con respecto a los resultados medios del módulo de elasticidad frente a los ataques por sales en tiempos de degradación de 0, 1 y 60 días, se aprecia que las diferentes muestras se diferencian en tres grupos: variaciones porcentuales menores al $\pm 10\%$, variaciones porcentuales entre $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ y variaciones porcentuales $> \pm 20\%$.

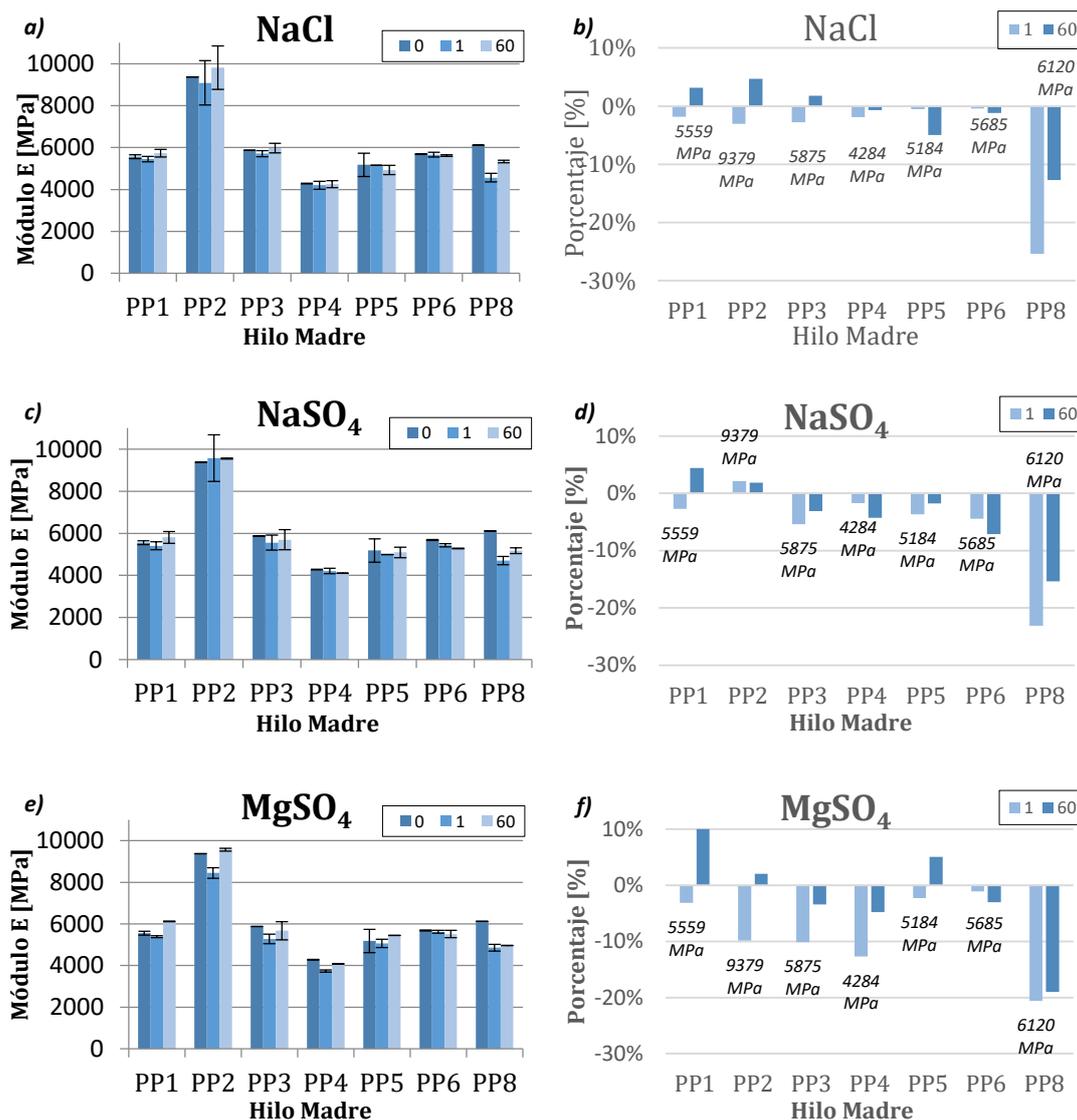


Figura 7.14 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a los ataques por sales: Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Magnesio (MgSO₄) y Sulfato de Sodio (NaSO₄) a edades de 0, 1 y 60 días.

En primer lugar, se analizan los resultados del módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva por sal en Cloruro de Sodio. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.14a y b. Con respecto a estos resultados, no se aprecian variaciones significativas en función a la degradación de la muestra, obteniendo variaciones porcentuales inferiores al $\pm 5\%$, exceptuando la muestra correspondiente a (PP8), proporcionando una variación porcentual del tercer grupo, con una disminución del módulo de elasticidad de un 25% al cabo de 1 día de ataque.

A pesar que tras 1 día de ataque la muestra presenta la mayor disminución de módulo de elasticidad, esta variación pierde importancia cuando se analiza a 60 días. A esta edad se presenta una disminución del módulo de elasticidad de un 13%, siendo este valor inferior al de 1 día de ataque.

En segundo lugar, se analizan los resultados del módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva por sal en Sulfato de Sodio. Los resultados de las diferentes

determinaciones se muestran en la Figura 7.14c y d. Los resultados presentan un comportamiento análogo a los resultados por Cloruro de Sodio, manifestando variaciones porcentuales menores al $\pm 10\%$, de igual manera exceptuando la muestra correspondiente a (PP8), que tras 1 día de ataque presenta la mayor disminución de módulo de elasticidad con un 23%, mientras que a 60 días es de un 13%.

En último lugar, se analizan los resultados del módulo de elasticidad a la disolución agresiva por sal en Sulfato de Magnesio. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.14e y f. Las muestras del primer grupo correspondientes a la menor variación porcentual $< \pm 10\%$, corresponden a las fibras PP1, PP2, PP3, PP5 y PP6. El segundo grupo corresponde a la muestra PP4 con una disminución de un 13% tras 1 día de ataque, y al llegar a los 60 días presenta una disminución inferior correspondiente al 5%. Finalmente, el tercer grupo correspondiente a la muestra PP8 con una disminución de la tensión del 21% al cabo de 1 día de ataque, mientras que un 19% a los 60 días de ataque.

Los resultados del ensayo del módulo de elasticidad se muestran en las tablas a continuación. En ellas se presentan los valores medios de los módulos de elasticidad correspondientes a las disoluciones agresivas por sales, alcanzadas por cada muestra de hilo madre, comprendido en un período de ataque de 1 y 60 días. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de fibra.

Tabla 7.12 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a cloruro de sodio [NaCl]

Ataque por Cloruro de Sodio [NaCl]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	5457	130,1	2,4	5735	178,2	3,1
PP2	9091,5	1057,1	11,6	9819	1036,6	10,6
PP3	5713,5	146,4	2,6	5981,5	231,2	3,9
PP4	4202,4	192,8	4,6	4254,7	160,9	3,8
PP5	5156,5	-	-	4926,6	221	4,5
PP6	5662,3	118,7	2,1	5619,4	44	0,8
PP8	4566,5	210	4,6	5341,7	63,6	1,2

Tabla 7.13 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a Sulfato de Sodio [NaSO₄]

Ataque por Sulfato de Sodio [NaSO ₄]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	5407	184,7	3,4	5805,3	282,9	4,9
PP2	9578,5	1108	11,6	9551	26,9	0,3
PP3	5559,3	359,4	6,5	5693,5	480,1	8,4
PP4	4209,5	124,4	3	4101,1	6,4	0,2
PP5	4992,4	-	-	5091	253,4	5
PP6	5432,3	69,2	1,3	5279,6	20,6	0,4
PP8	4704	203,6	4,3	5178,5	136,5	2,6

Tabla 7.14 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a Sulfato de Magnesio [MgSO₄]

Ataque por Sulfato de Magnesio [MgSO ₄]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	5384,5	44,5	0,8	6117	15,6	0,3
PP2	8454	254,6	3	9572	70,7	0,7
PP3	5281,5	232,6	4,4	5675	434,2	7,7
PP4	3740	49,5	1,3	4078,9	18	0,4
PP5	5065,9	202,1	4	5445,3	-	-
PP6	5623,5	64,3	1,1	5514,8	174,7	3,2
PP8	4859,5	166,9	3,4	4959	7,1	0,1

Con respecto a los ensayos de módulos de elasticidad correspondientes a los ataques químicos por sales, se muestran valores representativos frente al ensayo de módulo de elasticidad, con coeficientes de variación inferior al 11,6% para todas las muestras, tanto para 1 día de ataque como para 60 días de ataque.

Tomando en cuenta los resultados del módulo de elasticidad de las muestras sin atacar, la Figura 7.15 presenta los resultados de cada fibra sometidas a disoluciones agresivas por ácidos: Orgánico; Acético (CH₃COOH), y ácidos minerales; ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) a edades de 0, 1 y 60 días.

En primer lugar, se analizan los resultados del módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva por sal en Ácido Acético. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.15a y b. Con respecto a estos resultados, no se aprecian influencias en función a la degradación de la muestra, obteniendo variaciones porcentuales inferiores al $\pm 9\%$, exceptuando la muestra correspondiente a PP8, proporcionando a una variación porcentual del tercer grupo, con una disminución del módulo de elasticidad de un 21% al cabo de 60 días de ataque.

En segundo lugar, se analizan los resultados del módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva por sal en Ácido Clorhídrico. Los resultados de las diferentes determinaciones se muestran en la Figura 7.15c y d. Con respecto a estos resultados, las muestras del primer grupo correspondientes a la menor variación porcentual $< \pm 10\%$, presentaron las fibras (PP1, PP2 y PP3).

El segundo grupo corresponde a las muestras (PP4, PP5 y PP6) con una disminución del módulo de elasticidad entre $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ tras los 60 días de ataque. Finalmente, en el tercer grupo corresponde a la muestra (PP8) con una disminución del módulo de elasticidad de un $\pm 1\%$ tras los 60 días de ataque.

En último lugar, se analizan los resultados del módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva por sal en Ácido Sulfúrico (Figura 7.15e y f). Estos resultados presentan un comportamiento análogo a los resultados por Ácido Acético, manifestando variaciones porcentuales menores al $\pm 10\%$. Del mismo modo la muestra correspondiente a PP8 tras 1 día de ataque presenta la mayor disminución de módulo de elasticidad con un 18%, mientras que a 60 días un 15%.

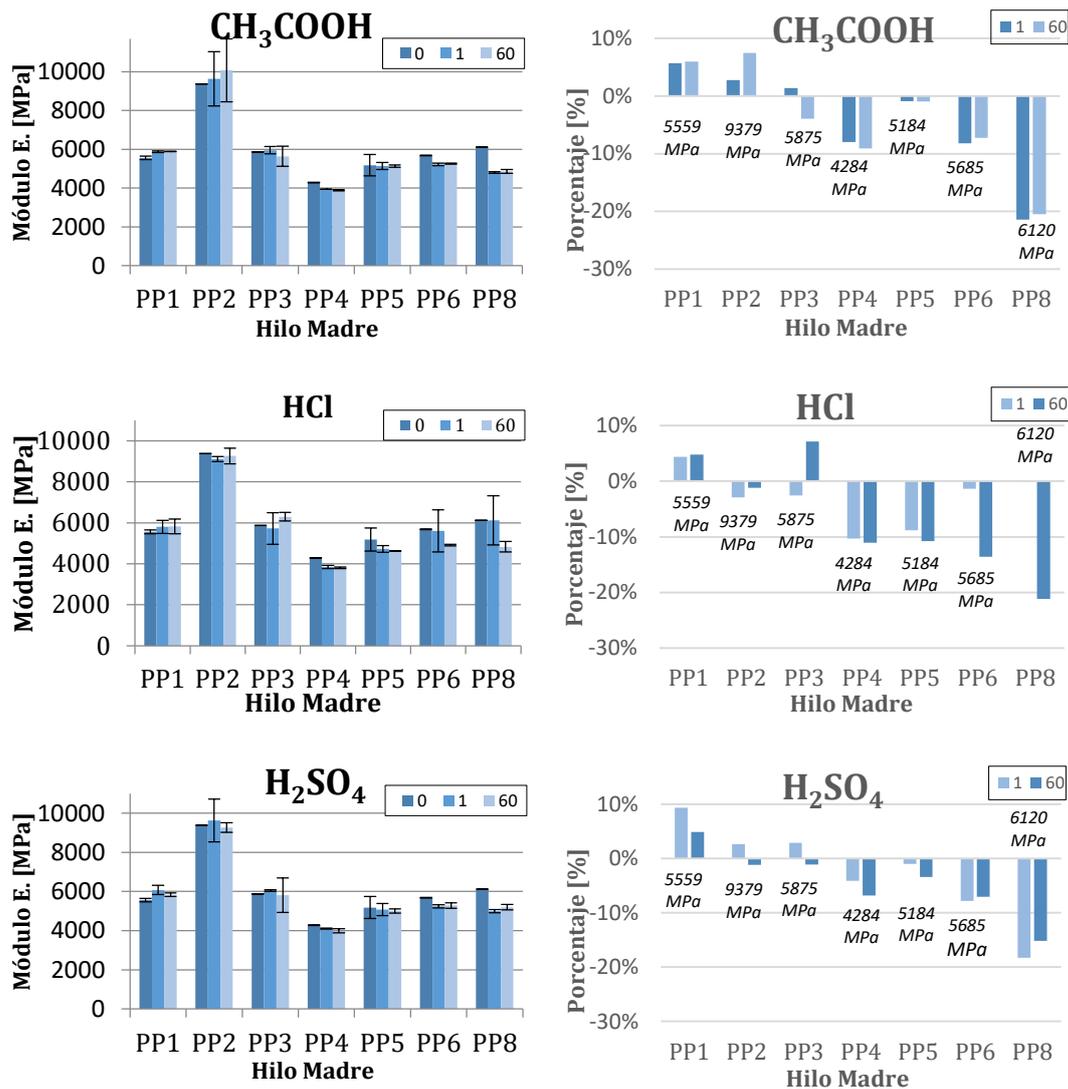


Figura 7.15 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a los ataques por ácidos: Orgánico (Acético CH_3COOH), y ácidos minerales (ácido clorhídrico HCl y ácido sulfúrico H_2SO_4) a edades de 0, 1 y 60 días.

Los resultados del ensayo del módulo de elasticidad se muestran en las Tablas 7.15, 7.16 y 7.17. En ella presentan los valores medios de los módulos de elasticidad correspondientes al ataque por ácidos, alcanzadas por cada muestra de hilo madre, comprendido en un período de ataque de 1 y 60 días. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de fibra.

Tabla 7.15 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a ácido Acético [CH₃COOH]

Ataque por ácido Acético [CH ₃ COOH]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	5875	48,1	0,8	5890,5	7,8	0,1
PP2	9636,5	1402,2	14,6	10077,5	1624,2	16,1
PP3	5956	192,3	3,2	5642,5	516,9	9,2
PP4	3941,8	4,6	0,1	3894,2	31,2	0,8
PP5	5137	182,6	3,6	5133,4	63,1	1,2
PP6	5218	66,5	1,3	5270,9	26,9	0,5
PP8	4808,5	38,9	0,8	4865	101,8	2,1

Tabla 7.16 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a ácido Clorhídrico [HCl]

Ataque por Ácido Clorhídrico [HCl]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	5801,5	317,5	5,5	5825	359,8	6,2
PP2	9108	121,6	1,3	9266	381,8	4,1
PP3	5725,5	774,3	13,5	6292,5	211,4	3,4
PP4	3841,6	77,4	2	3810,1	40,8	1,1
PP5	4724,8	161,7	3,4	4624,2	6,2	0,1
PP6	5607,1	1032,3	18,4	4913,5	40	0,8
PP8	6118,5	1195,7	19,5	4827	257,9	5,3

Tabla 7.17 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a ácido Sulfúrico [H₂SO₄]

Ataque por Ácido Sulfúrico [H ₂ SO ₄]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	6079	231,9	3,8	5831	91,9	1,6
PP2	9625,5	1093,9	11,4	9268	250,3	2,7
PP3	6045	44,5	0,8	5809	881,1	15,2
PP4	4107,6	30,8	0,7	3991,5	111,4	2,8
PP5	5076,8	307,8	6,1	5006,8	103,5	2,1
PP6	5239,3	83,9	1,6	5283,5	135,7	2,6
PP8	5001,5	79,9	1,6	5193	138,6	2,7

Con respecto a los ensayos de módulos de elasticidad correspondientes a las disoluciones agresivas por ácidos, presentan valores representativos frente al ensayo de módulo de elasticidad, con coeficientes de variación inferior al 19% para todas las muestras, tanto para 1 día de ataque como para 60 días de ataque.

Tomando en cuenta los resultados del módulo de elasticidad de las muestras sin atacar, la Figura 7.16 presenta los resultados de cada fibra sometidas a la disolución agresiva básico por hidróxido de Sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.

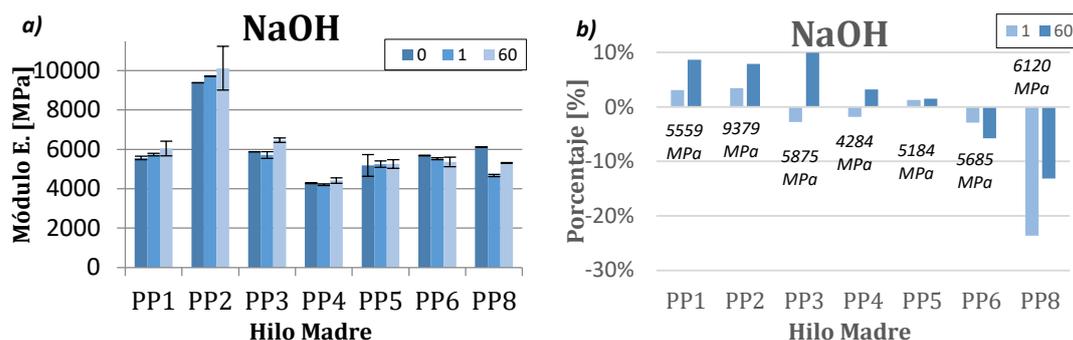


Figura 7.16 – Módulos de elasticidad de las fibras sometida al medio básico: Hidróxido de sodio (NaOH) a edades de 0, 1 y 60 días.

A continuación, se analizarán los resultados del módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva básica por Cloruro de Sodio.

Los resultados correspondientes al módulo de elasticidad frente a la disolución agresiva por hidróxido de sodio se muestran en la Figura 7.16a y b. Con respecto a estos resultados, no se aprecian influencias respecto a la degradación de la muestra, obteniendo variaciones porcentuales inferiores al $\pm 10\%$, exceptuando la muestra correspondiente a (PP8), proporcionando una variación porcentual del tercer grupo, con una disminución del módulo de elasticidad de un 24% al cabo de 1 día de ataque. A pesar que tras 1 día de ataque la muestra presenta la mayor disminución de módulo de elasticidad, esta variación pierde importancia cuando se analiza a 60 días, donde presenta una disminución del módulo de elasticidad de un 13%, siendo este valor inferior al de 1 día de ataque.

Los resultados del módulo de elasticidad se muestran en la Tabla 7.18. En ella presentan los valores medios de los módulos de elasticidad correspondientes a la disolución agresiva básico por hidróxido de sodio, alcanzadas por cada muestra de hilo madre, comprendido en un período de degradación de 1 y 60 días. Además, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada tipo de fibra.

Con respecto a los ensayos de módulos de elasticidad correspondiente al ataque químico básico, presentan valores representativos frente al ensayo de módulo elasticidad, con coeficientes de variación inferior al 11% para todas las muestras, tanto para 1 día de ataque como para 60 días de ataque.

Tabla 7.18 – Módulos de elasticidad de las fibras sometidas a Hidróxido de sodio [NaOH]

Ataque por Hidróxido de sodio [NaOH]						
Tipo de fibra	Período de degradación: 1 d			Período de degradación: 60 d		
	(E) [MPa]	DT	CV%	(E) [MPa]	DT	CV%
PP1	5732,3	67,5	1,2	6042	369,1	6,1
PP2	9704	-	-	10119	1108,7	11
PP3	5713,5	176,1	3,1	6461	111,7	1,7
PP4	4204,9	42,9	1	4421	138,5	3,1
PP5	5250,2	165,7	3,2	5260,3	214,5	4,1
PP6	5520	46,8	0,8	5359,2	241,6	4,5
PP8	4675,3	51,5	1,1	5317,5	14,8	0,3

7.3.3. Microscopía electrónica de Barrido

Las fibras analizadas en esta investigación, fueron estudiadas a través de microscopía electrónica, en su estado original y tras ser sometidas a diferentes disoluciones agresivas (NaCl 3%, H₂SO₄ 5%, NaOH 1M, NaSO₄ 5% y Ac. Acético 5%) durante 15, 30 y 60 días, con la finalidad de analizar y caracterizar la durabilidad de las fibras frente a ambientes agresivos. El objetivo principal es comprobar si las fibras sufren algún tipo de degradación a escala microscópica.

En las siguientes figuras se muestran las micrografías de las fibras sin y con ataques de los 5 medios. En este caso se muestra el resultado del ataque a 60 días, el cual debe de presentar el peor estado de la muestra frente a las demás. Las fibras analizadas para el estudio de microscopía electrónica de Barrido (SEM), fueron las correspondientes a las fibras derivadas de la poliolefina: PP1, PP2, PP3 y PP8.

La *Figura 7.17* expone los resultados de las micrografías, realizadas a muestra derivada de la poliolefina, PP1 sin atacar y muestras de algunas de las reacciones a 60 días de ataque.

Muestra PP1 sin atacar/ Muestra PP1 a 60 días atacada (x25)

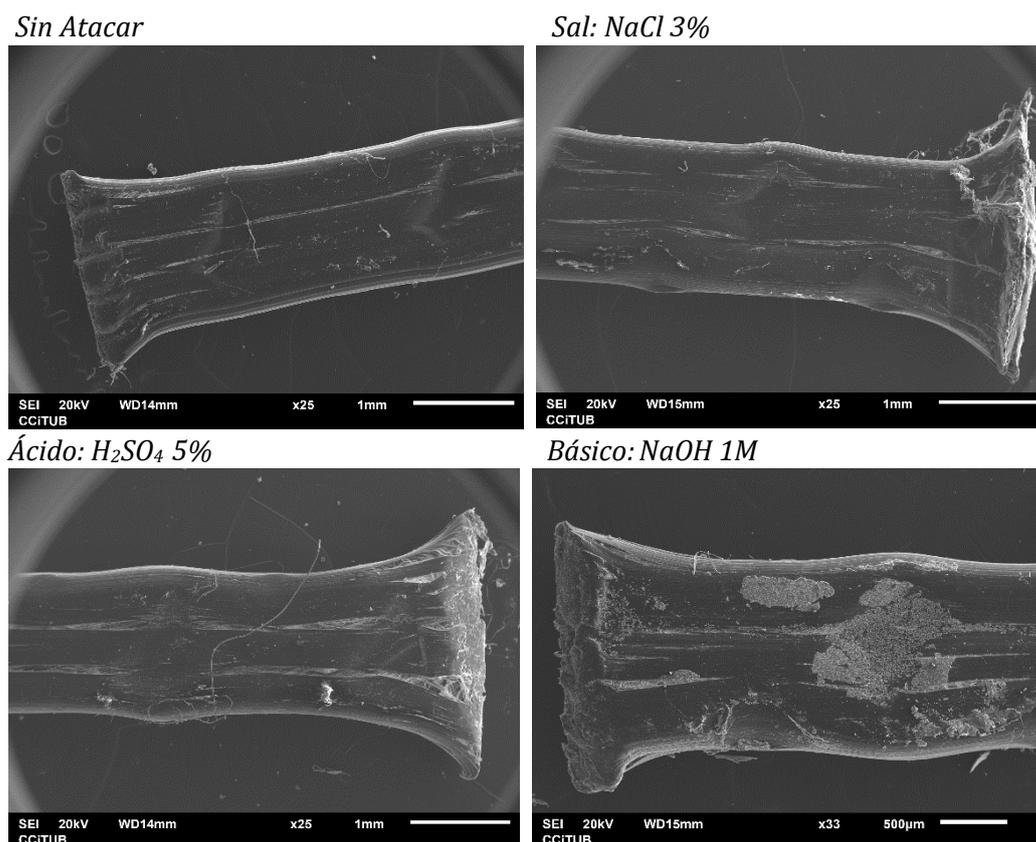


Figura 7.17 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP1 sin atacar, Sal: NaCl 3%, Ácido: H₂SO₄ y Básico: NaOH

Las muestras PP1 no presentan degradación superficial importante tras 60 días de ataque. Sin embargo, que para las condiciones alcalinas (NaOH 1M) se observan deposiciones de partículas así como una mínima degradación superficial. Sin embargo, esta

posible degradación pierde credibilidad al compararla con la influencia de la tensión última, donde en este caso tras ser atacada no se ha visto influenciada en la resistencia a tracción. La Figura 7.18 muestra los resultados de micrografía de SEM, realizadas a muestra derivada de la poliolefina, PP2 sin atacar y muestras de algunas de las reacciones a 60 días de ataque.

Muestra PP2 sin atacar/ Muestra PP2 a 60 días atacada (x70)

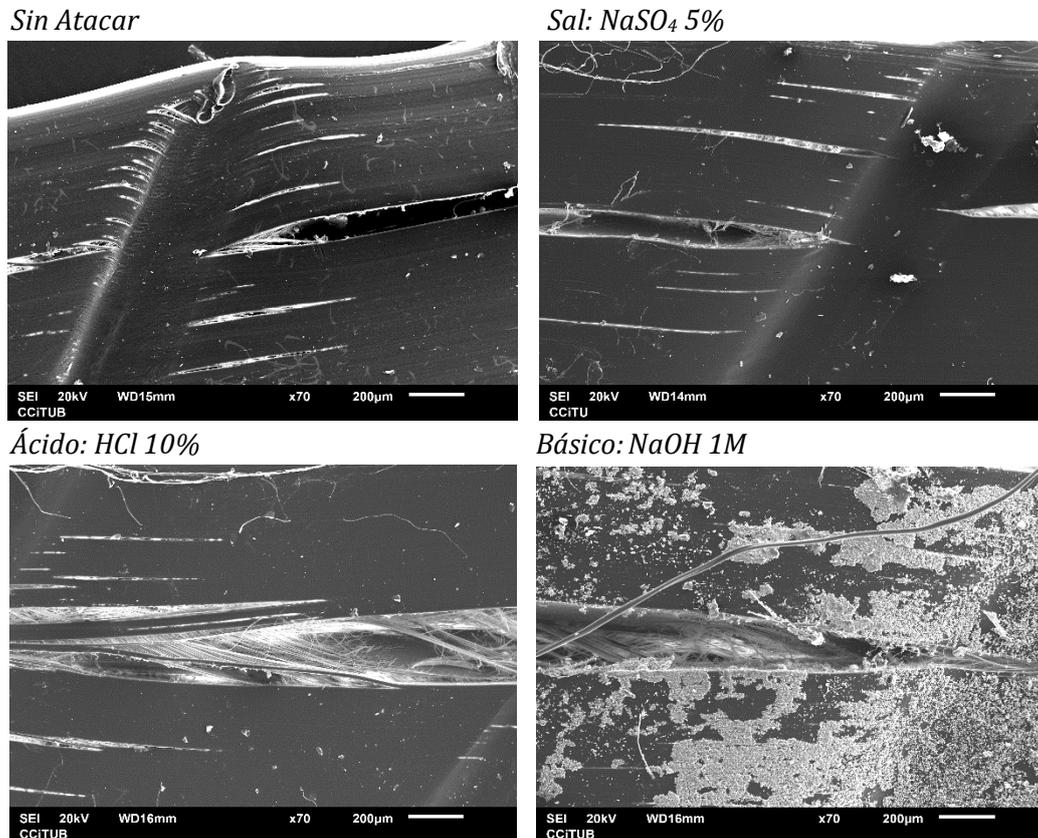


Figura 7.18 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP2 sin atacar, Sal: NaSO₄ 5%, Ácido: HCl 10% y Básico: NaOH

En cuanto a la fibra PP2, para todos los casos incluyendo la muestra sin atacar, se aprecia una ranura microscópica de la fibra, por lo que posiblemente dicha ranura es proveniente de la fabricación de la misma, y no a la posible degradación de la misma. Al igual que la muestra (PP1), para las condiciones alcalinas se observa el mismo tipo de deposiciones, pero en mayor contenido. Por el contrario, también pierde credibilidad al compararla con la influencia de la tensión última, donde en este caso tras ser atacada no se ha visto influenciada en la resistencia a tracción.

La Figura 7.19 muestra los resultados de micrografía de SEM, realizadas a muestra derivada de la poliolefina, PP3 sin atacar y muestras de algunas de las reacciones a 60 días de ataque.

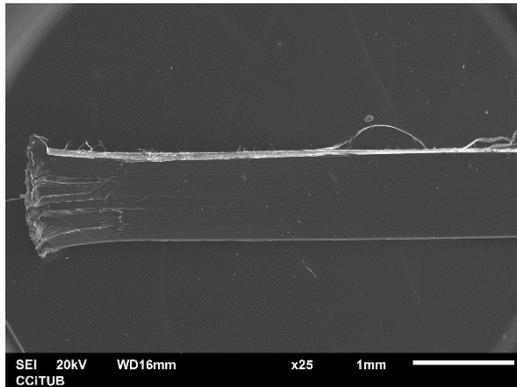
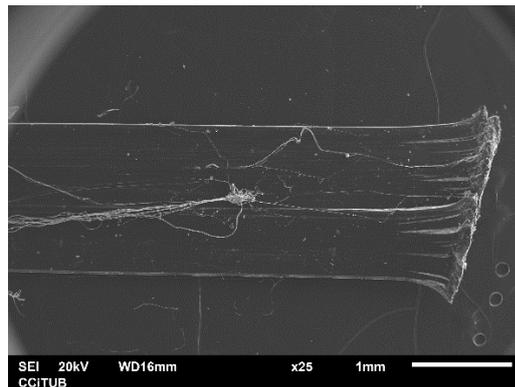
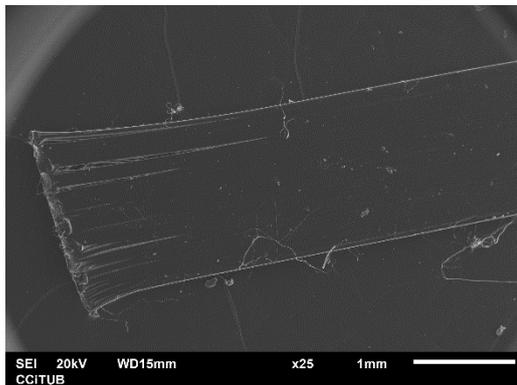
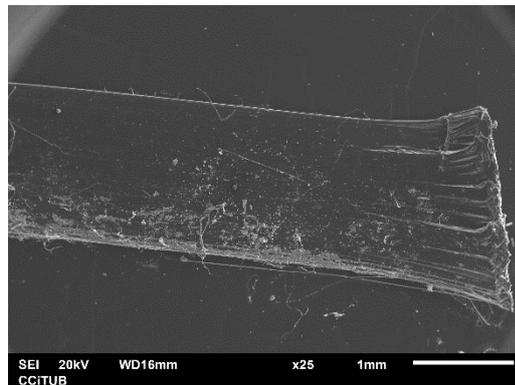
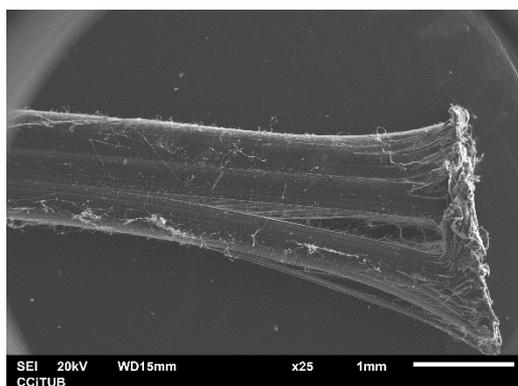
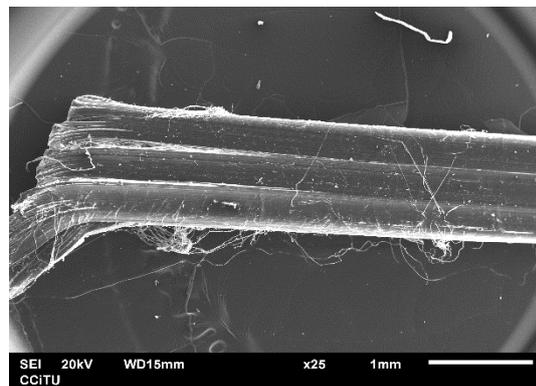
Muestra PP3 sin atacar/ muestra PP3 a 60 días atacada (x25)*Sin Atacar**Ácido: HCl 10%**Ácido: Acético 5%**Básico: NaOH 1M*

Figura 7.19 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP3 sin atacar, Ácido: HCl 10% y Acético 5%, y Básico: NaOH

Por lo que se refiere a las muestras (PP3), no se observa degradación superficial en las muestras tras 60 días de ataque. A pesar de que, para las condiciones alcalinas, parecen existir unas pequeñas deposiciones de material, esto no repercute en la pérdida de resistencia a la tracción.

La Figura 7.20 muestra los resultados de micrografía de SEM, realizadas a muestra derivada de la poliolefina, PP8 sin atacar y muestras de algunas de las reacciones a 60 días de ataque.

Muestra PP8 sin atacar/ Muestra PP8 a 60 días atacada (x25)*Sin Atacar**Ácido: HCl 10%**Ácido: H₂SO₄ 5%**Básico: NaOH 1M*

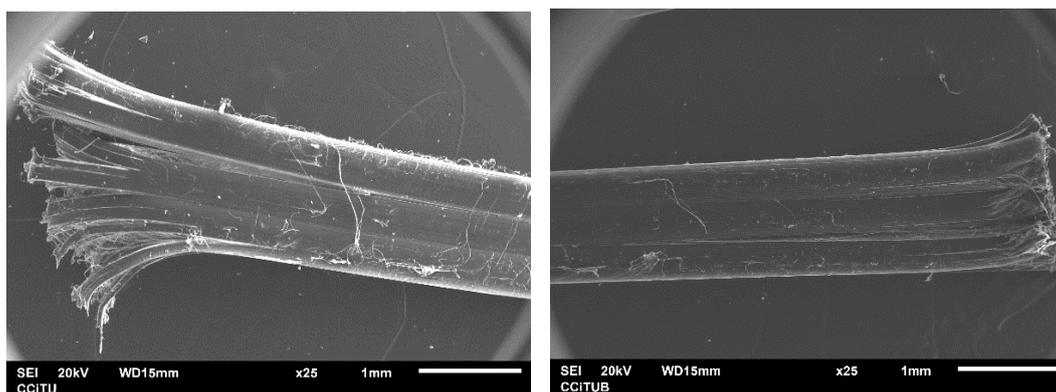


Figura 7.20 – Micrografías electrónicas SEM de la fibra PP8 sin atacar, Ácido: HCl 10% y H₂SO₄, y Básico: NaOH

Finalmente, se presentan los resultados de las muestras PP8, específicamente las micrografías de los medios ácidos y básicos, donde por lo general no se aprecian degradaciones significativas en las muestras tras 60 días de ataque. Para todos los casos, se aprecian unas aberturas de las fibras en sus extremos producidas, probablemente, por el corte de las muestras. Un análisis visual indica una posible degradación en la muestra atacada con HCl, siendo la muestra con mayor pérdida de tensión última, obteniendo un descenso del 16% ante la muestra sin atacar.

7.3.4. Espectroscopia Raman

Las fibras analizadas en este apartado, fueron sometidas al estudio a través de Micro-Raman en su estado original (sin atacar) y tras a una degradación de 60 días. Para este estudio solamente se han analizado las fibras derivadas de la poliolefina correspondientes a la PP1, PP2 y PP3.

En algunos casos las muestras se atacaban al ser irradiadas con el láser, por lo que se decidió trabajar con un láser de menor longitud de onda, 633nm. Para ello se utilizó un RM 2000 Renishaw Raman microscopy con una potencia de 25 mW. En ambos casos se utilizó un tiempo de adquisición de 10 segundos y se registraron 5 acumulaciones para mejorar la relación señal/ruido. Las frecuencias se calibraron con la banda de ± 520.6 nm del silicio.

En la Figura 7.21 se muestra el espectro Raman adquirido con el láser de 633 nm, de la muestra PP1 en los intervalos 3100-2700 cm^{-1} y 1800-100 cm^{-1} . Debido a la anchura de las bandas podemos indicar que el polímero no es cristalino, hecho avalado además por la ausencia de una banda a 1415 cm^{-1} .

Por lo que se refiere a los resultados de la fibra PP1, se observa que este polímero no se modifica en las disoluciones agresivas, ya que los espectros son similares. El compuesto es un polipropileno copolímero, lo que indica que tiene polietileno y polipropileno. Las señales Raman del primero son muy pequeñas con respecto al segundo, lo que nos indica la menor proporción del primero con respecto al segundo. Las muestras presentan una pequeña señal a 1085 cm^{-1} , lo que nos puede indicar la presencia de CaCO₃, que o bien se ha añadido a la muestra para mejorar sus propiedades o que proviene de los carbonatos de la matriz sobre la que han estado inmersos.

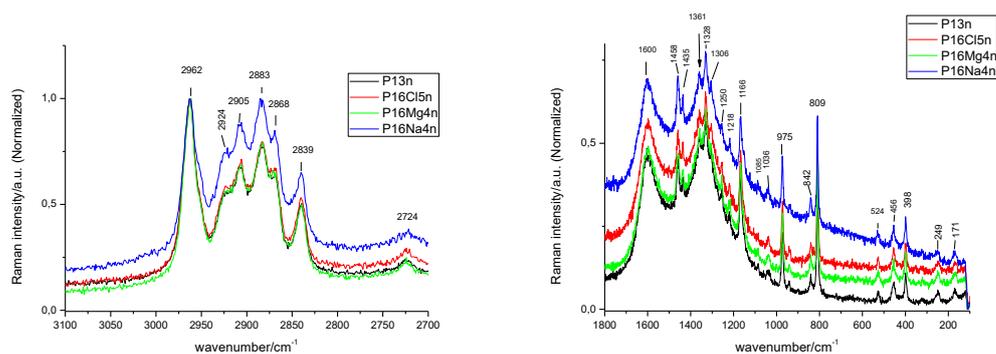


Figura 7.21 – Espectros Raman de la muestra PP1 inicial y en disoluciones agresivas ($\lambda = 633 \text{ nm}$)

En la Figura 7.22 se muestra el espectro Raman de la muestra inicial y sometida a los diferentes medios agresivos. Comparando estos espectros con los obtenidos para la muestra PP1, en este caso, se observa menor fondo, lo que puede indicar una muestra más cristalina.

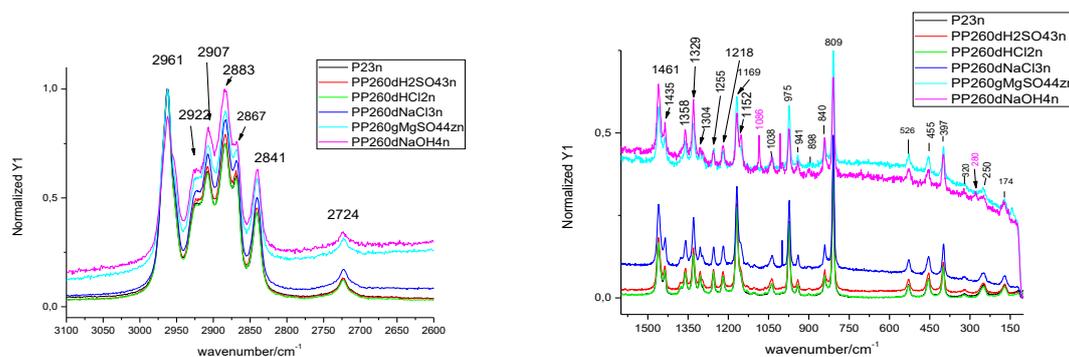


Figura 7.22 – Espectros Raman de la muestra PP2 inicial y en disoluciones agresivas ($\lambda = 633 \text{ nm}$)

Comparando los resultados de la muestra inicial y la sometida a las disoluciones agresivas, se observan algunos cambios en la muestra en NaOH. En primer lugar, aparecen muy intensas las señales de 1086 y 280 cm^{-1} , lo que indica una concentración de carbonatos superior a la del resto de las muestras. Por otra parte, en el intervalo 3000-2800 cm^{-1} se observa unas pequeñas diferencias como son un aumento de la señal de 2950 cm^{-1} y una disminución de la señal a 2867 cm^{-1} . En el caso de la muestra en la disolución agresiva de NaOH, ambas señales se deben a la presencia de grupos $-\text{CH}_3$ que se verían modificados.

Por otra parte, en este mismo medio se produce la disminución de la señal a 1375 cm^{-1} , asignada a la deformación simétrica de las uniones $-\text{C}-\text{CH}_3$ alifáticas. Podemos concluir con respecto a este polímero que no se modifica en las disoluciones agresivas, ya que los espectros son similares. A la vez, presentan una pequeña señal a 1085 cm^{-1} , lo que puede indicar la presencia de CaCO_3 , que o bien se ha añadido a la muestra para mejorar sus propiedades o que proviene de los carbonatos de la matriz sobre la que han estado inmersos.

En la Figura 7.23 se muestra el espectro Raman de la muestra inicial y sometida a los diferentes medios agresivos.

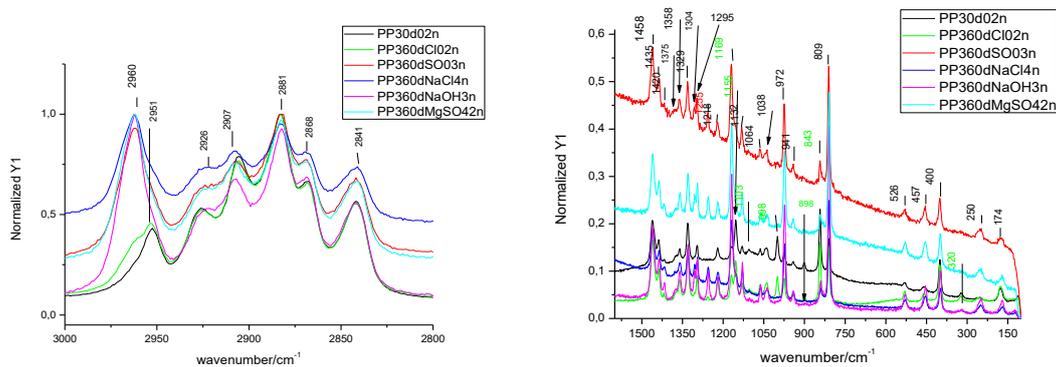


Figura 7.23 – Espectros Raman de la muestra PP3 inicial y en disoluciones agresivas ($\lambda = 633 \text{ nm}$)

Comparando los espectros en el intervalo $3000\text{-}2800 \text{ cm}^{-1}$ se observa que la muestra inicial y la que estuvo en medio HCl presentan una señal intensa en 2951 cm^{-1} y una de intensidad media a 2960 cm^{-1} . Sin embargo, en el resto de las muestras la señal más intensa aparece a 2960 cm^{-1} . Ello nos indica que la muestra inicialmente presenta menos unidades $-\text{CH}_3$ y más unidades $-\text{CH}_2$ y que con los medios agresivos (excepto HCl) se incrementan las unidades $-\text{CH}_3$, debido a que se rompe el polímero.

Otras diferencias importantes observadas en los espectros es la desaparición de la señal a $1153; 1000; 900 \text{ cm}^{-1}$ así como la disminución en intensidad de la señal de 842 cm^{-1} . Por otra parte, aparecen señales a 1255 y 972 cm^{-1} y se incrementan las señales de $1167; 1129$ y 811 cm^{-1} .

7.4. CONCLUSIONES

Tras evaluar la durabilidad de las fibras no metálicas, se ha verificado el comportamiento durable de un conjunto de 7 tipos de fibras no metálicas en hilo madre. Por lo general, no se aprecian degradaciones significativas en las muestras sobre ninguna de las diferentes disoluciones agresivas empleadas, donde se pudiesen alterar de manera significativa las propiedades físicas o mecánicas del material.

- En cuanto a los resultados de resistencia a tracción, el estudio exhibe que las muestras ensayadas presentan tensiones últimas menores que las suministradas por los fabricantes, de hasta un 104% inferior como el caso de la fibra PP4.
- En general, la fibra PP2 presenta los mayores resultados de resistencia a tracción, que, a su vez, se ve reflejado en el resultado de módulo de elasticidad. Por lo tanto, se necesitará una gran tensión para deformar la fibra debido a su rigidez, pero a la vez su falla será frágil. En consecuencia, la fibra PP3 presenta propiedades mecánicas más adecuadas, con una alta resistencia a tracción y un módulo de elasticidad más bajo.

- Tomando en cuenta los resultados de las muestras sometidas a las disoluciones agresivas por sales a 60 días, no se aprecian influencias de degradación en la muestra en cuanto a la resistencia a tracción, exceptuando la muestra (PP8) sometida al MgSO_4 y PP5 sometida al Ácido Clorhídrico la cual presentan variaciones porcentuales de aproximadamente 25% respecto a la muestra sin atacar.
- En cuanto al Estudio a través de Microscopía electrónica de Barrido (SEM), no se observan indicios de degradación de la muestra; sí que para el caso de las condiciones alcalinas se observa un ligero teñido superficial de la muestra y, por ende, intuir un posible inicio de degradación. No obstante, dicha teoría pierde credibilidad al compararla con la influencia de la tensión última, donde en este caso tras ser atacada, no se han visto influenciada en la resistencia a tracción.
- Finalmente, acerca del estudio de espectroscopia Raman para el caso de las muestras analizadas PP1, PP2 y PP3, se pueden observar diferencias entre los espectros de las muestras sin atacar y atacadas lo que parece indicar la existencia de modificaciones a nivel molecular en las fibras. Este hecho no parece tener una influencia importante en las características mecánicas y durables de las mismas a nivel macroscópico.

8. ESTUDIO DE LA DOVELA A ESCALA REAL REFORZADA CON FIBRAS ESTRUCTURALES

8.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se han abordado aspectos relacionados a la viabilidad estructural y de la durabilidad del HRFnM a partir de ensayos de caracterización, de control de calidad, y del estudio de la durabilidad en macrofibras sintéticas.

Sin embargo, una vez garantizado el estudio sobre la viabilidad estructural y de durabilidad de las macrofibras no metálicas con finalidad estructural, surge la necesidad de realizar un estudio del elemento a escala real, en este sentido referente a dovelas prefabricadas, armadas únicamente con fibras estructurales para túneles excavados con máquina tuneladora. Se evalúan dos dovelas, una de hormigón reforzado con fibras de polipropileno *HRFP*, correspondiente a la fibra con mejores prestaciones presentados en los capítulos anteriores (PP4), asimismo, con la finalidad de comparar los resultados, una segunda dovela de hormigón reforzada con fibras de acero *HRFA*.

8.1.1. Objetivos

A pesar de que se han realizado numerosas investigaciones sobre la sustitución parcial o total del armado tradicional del hormigón por las fibras de acero (Abbas *et al.*, 2014; Gong *et al.*, 2017; Liao, 2015), poco estudio existe sobre el comportamiento a flexión de elementos tipo dovela reforzados con macrofibras plásticas estructurales.

Con la finalidad de utilizar de manera satisfactoria el uso de las macrofibras plásticas como único refuerzo en la dovela, se ha de validar su respuesta estructural mediante un estudio a flexión de la dovela a escala real. Para dar respuesta a la viabilidad del diseño estructural de la dovela reforzada con fibras, este capítulo persigue como objetivos:

- Exhibir los resultados de la campaña experimental sobre las dovelas a escala real reforzadas totalmente con fibras de polipropileno y fibras metálicas, con la finalidad de comparar su respuesta estructural.
- Analizar y comparar los resultados de la campaña experimental realizada sobre la dovela reforzada con fibras de polipropileno HRFp y la dovela reforzada con fibras metálicas HRFA.
- Simular la flexión de las dovelas considerando el modelo constitutivo del Model Code-2010, utilizando un software de elementos finitos, y a la vez comparar las predicciones obtenidas del modelo con los datos experimentales.

8.1.2. Organización del estudio

En el *apartado 8.2* se presenta los aspectos metodológicos sobre la campaña experimental de las dovelas a escala real realizada. Tras ello, el *apartado 8.3* aborda el análisis de los resultados referente al ensayo a flexión de las Dovelas. Seguidamente, en el *apartado 8.4* se presenta el modelo de elementos finitos utilizado para simular el comportamiento a flexión de las dovelas reforzadas con fibras de polipropileno y metálica, con la intención de comparar y validar la idoneidad de los modelos constitutivos utilizados.

8.2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En los últimos años la construcción de túneles a nivel mundial se ha extendido el empleo de hormigones reforzados únicamente con fibras de acero, existiendo varios ejemplos como: la línea de Klang Valley MRT-SBK Line en *Malaysia* (2013-2016), Crossrail C-305 UK (2012), Northwest Rail Link AU (2013), entre otros.

Sin embargo, estudios sobre el concepto de una dovela prefabricada sostenible, armada únicamente con fibras estructurales no metálicas, es por el momento muy minoritaria, existiendo pocos ejemplos en el mundo, debido a la falta de experiencia con este tipo de fibras y al desconocimiento de los beneficios que pueden ofrecer a largo plazo. Existen ejemplos de uso de fibras plásticas, como el túnel hidráulico en *Londres* que pertenece a la Red Nacional de Conducción de Gas (2008), el túnel de servicios públicos de *Londres*, y el túnel Euclid Creek en *Cleveland USA*.

A partir de los estudios mostrados en los capítulos anteriores, donde se ha demostrado la viabilidad estructural de las macrofibras no metálicas con finalidad estructural, este apartado presenta la campaña experimental de la dovela a escala real. En este sub-apartado se detalla los elementos a ensayar, materiales, el proceso de ejecución y finalmente la configuración y la metodología del ensayo.

Las dovelas fueron fabricadas la planta de dovelas situada en Ottawa para la ejecución de la obra Combined Sewage Storage Tunnel (CSST Project), que pertenece a la empresa de prefabricados Power Precast. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de materiales de la Universidad de Ottawa (uOttawa).

8.2.1. Elementos a ensayar

Durante la presente campaña experimental se han fabricado dos dovelas a escala real, una reforzada únicamente con fibra derivada de la poliolefina, y una reforzada únicamente con fibra metálica.

Ambas dovelas presentan una geometría de un cuadrilátero tipo romboide, con la misma dimensión, correspondiente a 1717 mm de longitud media, 1205 mm de ancho y un canto de 200 mm. La Figura 8.1 muestra el aspecto de las dovelas ensayadas en la campaña experimental.

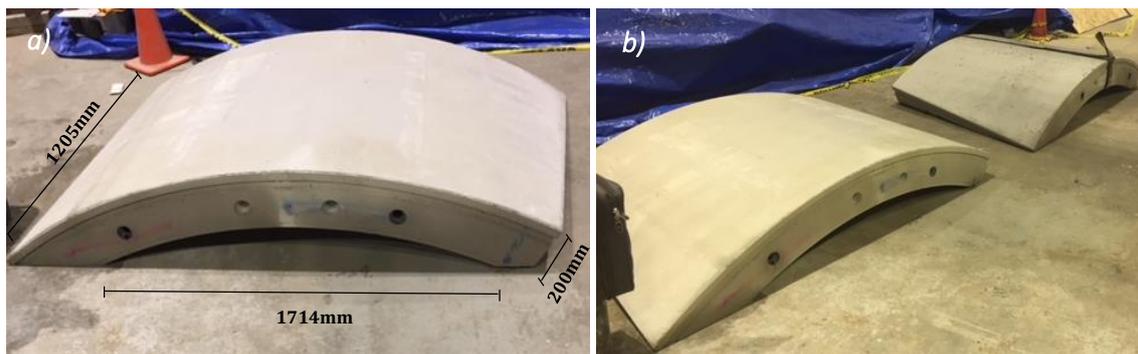


Figura 8.1 – Dimensionamiento de la dovela en vista frontal a). Dovelas listas para ser ensayadas b).

8.2.2. Materiales empleados

Con la finalidad de evaluar la influencia de las fibras en respuesta estructural, se han hormigonado dos dovelas, una reforzada con la fibra PP4, correspondiente a la fibra con mejores prestaciones en los capítulos anteriores y con la finalidad de validar y comparar los resultados, una segunda dovela reforzada con fibras metálica. Para ambas dovelas se ha empleado un hormigón de consistencia plástica y de alta resistencia.

Para la dovela correspondiente a la fibra derivada de la poliolefina se ha utilizado un contenido de fibra de 1% del volumen (que corresponde a 10 kg/m^3 de fibras de polipropileno) y para la dovela reforzada con fibra metálica se ha utilizado un contenido de fibra de 0,50% del volumen (que corresponde a 40 kg/m^3 de fibras metálicas).

A pesar que los contenidos de fibra en volumen en ambos hormigones no son equivalentes, se ha optado por emplear un contenido de 0,50% en la dovela, cuantía de

acero la cual suele emplearse frecuentemente siendo los 40 kg/m^3 los fabricados para la obra CSST en Ottawa.. Ambas dovelas contienen la misma geometría y han sido ensayadas a una edad parecida (de aproximadamente 6 meses).

Para la sustitución total de la armadura pasiva por fibras de acero, empleando este tipo de dosificación, es recomendable emplear cuantías razonables a nivel técnico y económico de $30 - 40 \text{ kg/m}^3$, por ende, el contenido empleado para esta campaña experimental cumple con estas características.

A continuación, la Tabla 8.1 presenta las características de ambas fibras suministradas por diferentes tipos de empresas. De aquí en adelante se denominará PP4 a la fibra de polipropileno empleada y FA a la fibra de acero.

Tabla 8.1 – Características de las fibras

Propiedades	PP4	FA
Material	Polipropileno	Acero
Resistencia a la tracción [Mpa]	640	1225
Longitud [mm]	48	60
Diámetro [mm]	0,91	0,75
(l/d)	53	80
N° fibras/kg	59500	4690
Módulo elástico [GPa]	10	200

Según las especificaciones de los principales parámetros físicos mostrados en el capítulo 3, presenta que su longitud (lf) y su diámetro equivalente (df), donde el cociente como esbeltez (l/d) juega un papel preponderante, en la cual manteniendo una relación directa mejora las propiedades en el hormigón, en donde los valores de esbeltez empleados en esta investigación comprenden valores no mayores al 80 el cual se considera aconsejable.

8.2.3. Materiales empleados

Los ensayos se han llevado a cabo en el laboratorio de Estructuras de la Universidad de Ottawa, en donde se ha realizado el ensayo a flexión de las dos dovelas (reforzada con fibras plástica y metálica). La configuración utilizada se muestra en la (Figura 8.2 a), donde se plantea la configuración de un ensayo de 3 puntos, con carga en el centro del vano y apoyada en los extremos.

Previo al ensayo, las dovelas se han de cortar, con la intención de lograr una superficie plana paralela al perfil metálico de carga y además se debe colocar una placa metálica entre la dovela y la losa de reacción (suelo) donde se coloca el elemento, con la finalidad de homogeneizar el contacto y reducir la fricción. Se han de colocar sensores de hilo en el lateral de la dovela y en el centro del vano, con la finalidad de controlar la apertura de fisura. (Figura 8.2 b y c).

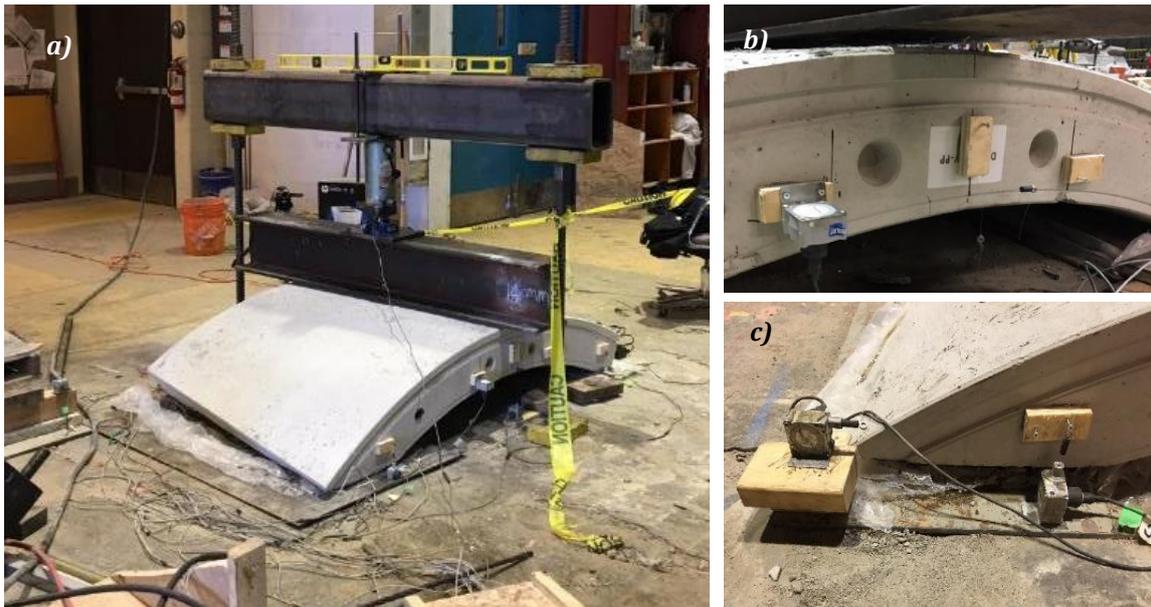


Figura 8.2 – Configuración del ensayo a). LVDT colocados con la finalidad de medir el ancho de fisura debida al ensayo a flexión b). Detalle de la zona de los apoyos c).

Durante la realización del ensayo, la carga se aplica en el centro del vano, donde el control se realiza por posición al tratarse de un método seguro, donde se podrá obtener respuestas estructurales de tipo dúctil. La velocidad de aplicación de carga fue tal que el crecimiento de la apertura de fisura fue de 0,2 mm/min.

8.3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN A ESCALA REAL

Los resultados presentados en este apartado se estructuran en tres secciones. Inicialmente se pretende analizar los patrones de fisuras producidos una vez finalizado el ensayo a flexión. Posteriormente a partir de los datos obtenidos del ensayo, se pretende analizar el comportamiento del ancho de fisura y flecha, tomando en cuenta la repercusión del ensayo, en respuesta a pequeñas aperturas de fisuras (ELS) como a mayores aperturas de fisura (ELU).

8.3.1. Fisuración

La figura mostrada a continuación, presenta los patrones finales de fisuración, tanto de la dovela reforzada con fibras plásticas como la dovela reforzada con fibras metálicas. A tal efecto, se presenta documentación tanto fotográfica como mapas de fisuras. Una vez finalizados los ensayos, la Figura 8.3 presenta tanto de la cara frontal (F) como de la cara posterior (P), las fotografías y mapas de fisuras de ambas dovelas.

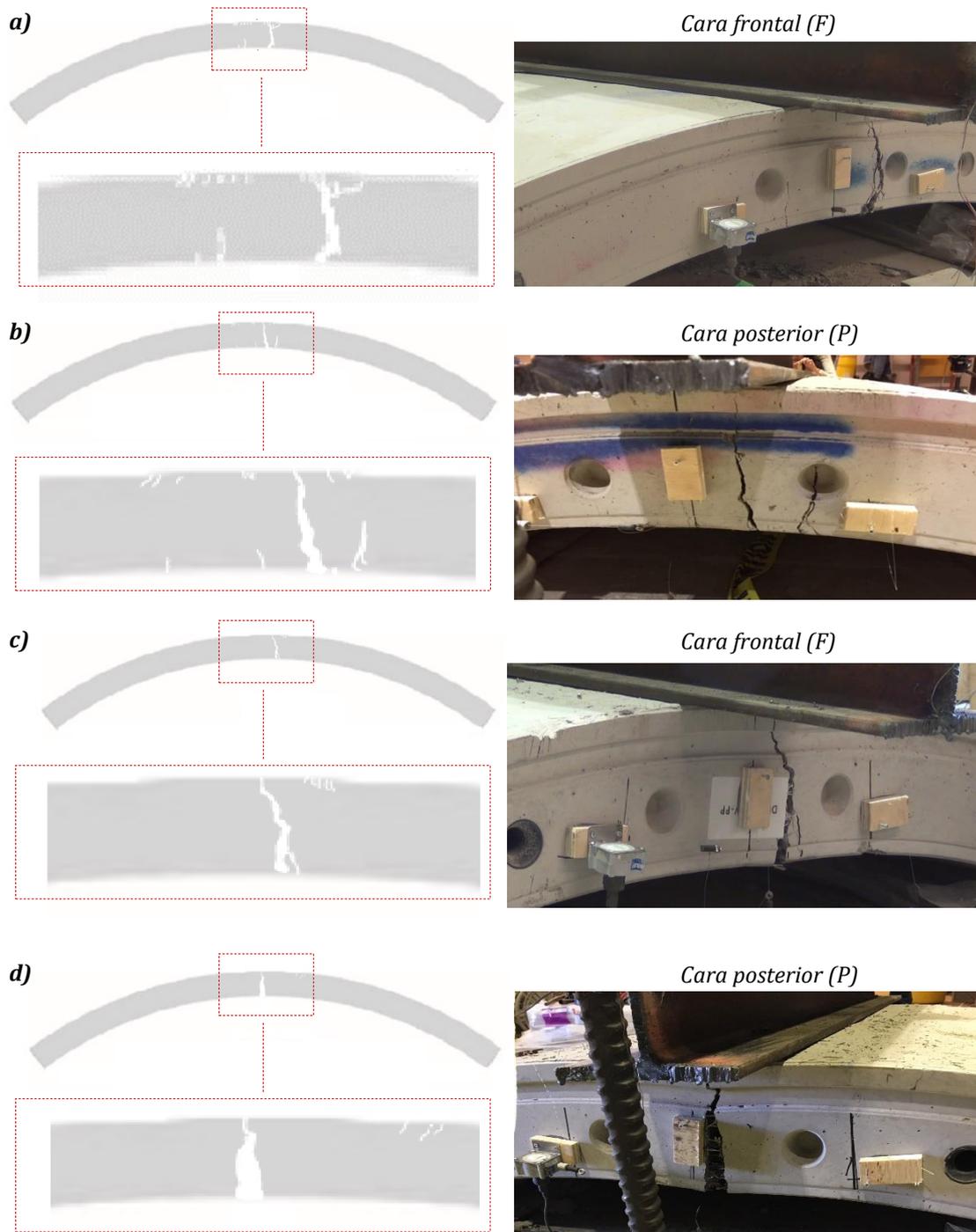


Figura 8.3 – Mapa de fisuración y fotografía de la Dovela: (F) reforzada con fibra metálica a). (P) reforzada con fibra metálica b). (F) reforzada con fibra plástica c). (P) reforzada con fibra plástica d).

La Figura 8.3 presenta los patrones finales de fisuras de ambas dovelas. Para ambos elementos, la fisura principal predomina en el centro del vano, donde surge desde la parte inferior del elemento y se produce por rotura según las condiciones de equilibrio. A mayor valor de carga, la fisura trasciende de manera progresiva a través de la profundidad del elemento. Para ambos patrones de fisuración, las fibras tienden a alinearse en paralelo a la

superficie de encofrado, y por tanto las fibras se orientan en una dirección favorable para coser las fisuras de las Dovelas tras el ensayo a flexión.

Se puede observar que, para la Dovela reforzada con fibra plástica, solo se presenta una fisura principal, mientras que en la dovela reforzada con fibra metálica dos fisuras atraviesan el extendido horizontal de los sensores del centro de vano, presentando una reducción de apertura de fisura con respecto a la dovela reforzada con fibras plásticas.

En cuanto al uso de la fibra metálica, tras finalizar el ensayo la abertura de fisura debido a la flexión disminuye un 45% aproximado respecto a la dovela de HRFP, produciendo una fisura secundaria a aproximadamente a 52 mm de la fisura principal.

8.3.2. Comportamiento a flexión: ancho de fisura

Tal y como se ha mencionado en la configuración del ensayo, se ha registrado la apertura de fisura de las dovelas mediante sensores de hilo de desplazamiento. En el caso de ambos resultados se ha utilizado el valor medio del ancho de fisura tanto de la cara frontal como la posterior. Los resultados en términos de carga (F) y ancho de fisura (w) se presentan en la Figura 8.4.

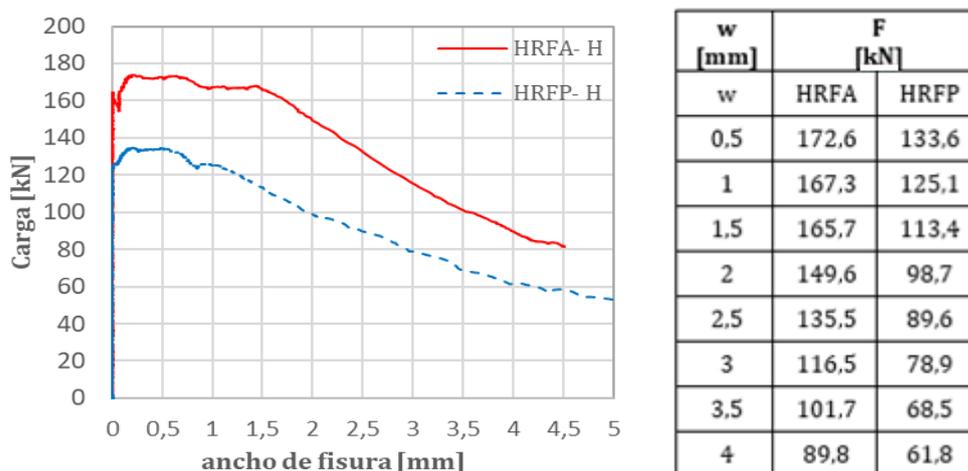


Figura 8.4 – Curva carga – ancho de fisura en el centro del vano

En la Figura 8.4 se observa como la dovela reforzada con fibras de polipropileno (HRFP) muestra un comportamiento parecido, pero a la vez inferior al (HRFA), presentando menor carga residual. Se presenta un comportamiento elástico lineal hasta alcanza la carga de rotura (F_{cr}) de 112,6 kN y 142,0 kN para el HRFP y HRFA respectivamente. Aunque ambas geometrías son aproximadamente equivalentes en ambos ensayos, esta variación del 26% en la carga de rotura puede atribuirse a la variación del límite de proporcionalidad (f_L) de cada dovela, que dependen de la matriz de hormigón y su dosificación.

Para ambos tipos de dovelas, una fisura principal en el centro del vano se ha formado (Figura 8.3), a partir de la carga de rotura, en el HRFA se observa un comportamiento *hardening* hasta aperturas de fisura de 1,4 mm, a partir de ahí, para ambos elementos presenta un descenso de la carga con respuesta dúctil. Para valores cercanos a 1,5 mm el HRFA presenta una carga superior al HRFP correspondiente al 41,1%. Sin embargo, en el

caso de aperturas de fisuras correspondientes a 3,5 mm el HRFA presenta un valor superior a 48,4% respecto al HRFP.

Para ambos tipos de elementos se afirma la eficiencia de ambas fibras, en donde presentan buenas prestaciones tanto para anchos de fisuras pequeños (observando un comportamiento *hardening*), y a la vez a mayores anchos de fisura presenta un descenso de la carga, presentando una contribución dúctil del material.

8.3.3. Comportamiento a flexión: flecha

Los resultados obtenidos del ensayo a flexión correspondientes a la dovela reforzada con fibra plástica (HRFP) y metálica (HRFA) se presentan a continuación. La Figura 8.5 representa la curva carga – desplazamiento vertical (V) en el centro del vano para ambas dovelas. La flecha se ha registrado durante los ensayos mediante sensores de hilo de desplazamiento en el centro de la luz de la dovela.

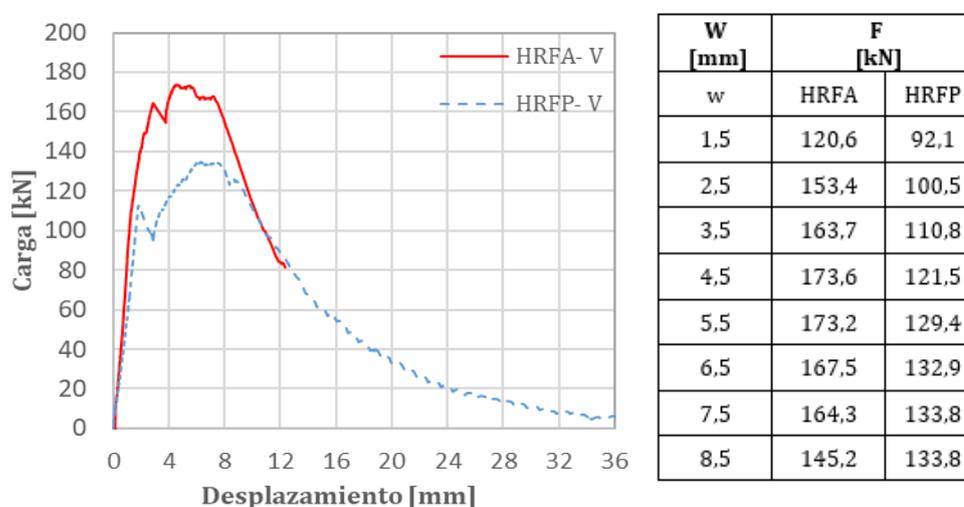


Figura 8.5 – Curva carga – desplazamiento en el centro del vano

En lo que respecta la curva carga – desplazamiento vertical de ambos elementos, presentan un comportamiento análogo a la gráfica carga – ancho de fisura, en donde la etapa de pre-fisuración asume un comportamiento lineal, las tensiones y deformaciones se mantienen hasta que se alcanza el momento de rotura, que produce la fisuración del hormigón. En este momento un descenso de ambas pendientes es observable fruto de la disminución de la rigidez del elemento.

A partir de la fisuración, la carga realiza un ligero descenso, hasta que las fibras comienzan a trabajar, empleando su mecanismo de adherencia y compatibilidad de deformaciones. La Figura 8.5 muestra que ambas curvas son capaces de soportar una carga incluso superior a la del hormigón en el momento de fisuración, obteniendo una carga superior a la de rotura. En el caso del HRFP, este tipo de comportamiento se mantiene hasta un desplazamiento de 6,8 mm a partir de ahí, la carga soportada muestra un ligero descenso. De igual manera el HRFA presenta un comportamiento similar en cuanto a la carga superior a la de rotura, aunque en menor proporción que en la dovela de HRFP, que en este caso puede apreciarse hasta un desplazamiento de 6 mm.

A pesar de que la HRFA presenta la carga pico a flexión y cargas residuales superior al HRFP, el comportamiento de ambas dovelas es muy parecido. Para ambos casos las fibras trabajan de una manera satisfactoria superando la carga de hormigón a flexión (rotura) hasta llegar a unos 6 mm de desplazamiento.

Con los datos obtenidos se puede asegurar que las fibras de polipropileno son capaces de soportar altas cargas una vez que se han producido fisuras en el hormigón. Teniendo en cuenta que en los requisitos de ensayos de control (ya sea mediante la norma UNE EN 14651 ó ASTM C1609) se exige una resistencia residual para una apertura de fisura de 2,5 ó 3,0 mm respectivamente, se corrobora el buen comportamiento a escala real de las fibras.

8.4. SIMULACIÓN DE LAS DOVELAS A ESCALA REAL

Este último apartado de esta tesis doctoral pretende mostrar la simulación de los ensayos mecánicos de las dovelas empleadas en este capítulo (reforzada con fibras de polipropileno HRFP y metálica HRFA). Teniendo la configuración empleada del ensayo junto con la contribución residual de las fibras, el análisis de su comportamiento estructural se ha abordado mediante a la simulación numérica recurriendo a un modelo no lineal 2D de elementos finitos. Una vez obtenida la simulación, se ha de realizar la comparación de los resultados numéricos con los experimentales expuestos anteriormente.

8.4.1. Modelo no lineal de elementos finitos

Se ha utilizado el software de elementos finitos ABAQUS. Se ha empleado para modelar el comportamiento no lineal de las dovelas reforzada con fibras de polipropileno como metálicas, en dos dimensiones (deformación plana). El modelo de elemento finitos a utilizar ha de ser representativo a la campaña experimental realizada, en cuanto a sus características geométricas como a las propiedades mecánicas del mismo.

La Figura 8.6 muestra el modelo de elemento finito empleado, coincidiendo con las mismas condiciones del ensayo a flexión a escala real. En los bordes inferiores el desplazamiento vertical impedido ($U_y=0$) así como el horizontal en una de ellas ($U_x=0$). La carga ha sido aplicada mediante control por desplazamiento en el centro del vano, de la cara superior de la dovela.

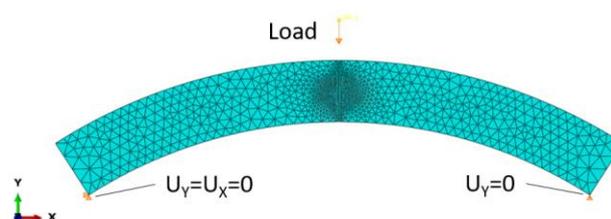


Figura 8.6 – Modelo de elementos finitos, malla y condiciones de contorno.

Debido a que la discretización de la malla es la que condiciona el grado de exactitud de la solución del modelo y asimismo su coste computacional, se ha optado por reducir el tiempo computacional sin comprometer los resultados mediante: una malla compuesta por

1034 nodos y 1927 elementos lineares triangulares (CPE3) de 30 mm de tamaño, refinada en la parte central. Se ha utilizado la solución no lineal cuasi-estática (*Dynamic, Explicit*) debido a que este recoge largas deformaciones en situaciones de postfisuración.

8.4.2. Parámetros para la simulación de la dovela

Las ecuaciones constitutivas de tensión-deformación ($\sigma - \varepsilon$) y tensión-apertura de fisura ($\sigma - w$) pueden ser utilizadas para modelar el comportamiento del HRF. Según los estudios de (Buratti *et al.*, 2011), las curvas $\sigma - \varepsilon$ son consideradas las más adecuadas para los elementos combinados con HRF y armadura convencional debido a la distribución de las fisuras, mientras que los hormigones reforzados únicamente con fibras suelen presentar una sola fisura, la ecuación ($\sigma - w$) suelen ser la más recomendadas (Galeote, 2018). La Figura 8.7 presenta esquemáticamente el comportamiento a tracción del HRF tanto para la tensión- deformación como el ancho de fisura.

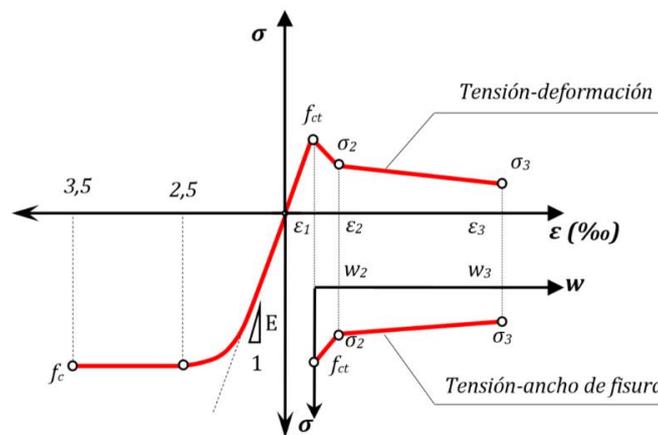


Figura 8.7 – Diagrama constitutivo del comportamiento a compresión y a tracción (Pujadas, 2013b).

La respuesta tensión-deformación a tracción del HRF se modela con la ley constitutiva multilínea propuesta por (FIB Model Code, 2010). Esta relación se rige por la resistencia a la tracción del hormigón (f_{ct}) y la resistencia residual última a flexión (f_{Fts} y f_{Ftu} respectivamente), evaluadas mediante las ecuaciones [8-1] y [8-2].

$$f_{Fts} = 0,45 f_{R1} \quad [8-1]$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5f_{R3} + 0,2f_{R1}) \geq 0 \quad [8-2]$$

Dónde:

- f_{R1} : Resistencia residual a flexión para $CMOD1 = 0,5$ mm.
- f_{R3} : Resistencia residual a flexión para $CMOD3 = 2,5$ mm.
- w_u : Apertura de fisura última.

Para modelar el comportamiento de ambos tipos de hormigones, se ha de tomar en consideración las curvas tensión – ancho de fisura (σ - w) a tracción según las ecuaciones constitutivas para HRF del MC-2010. El parámetro clave que relaciona deformación (ϵ) con ancho de fisura (w) es la longitud característica (l_{cs}), ver ecuación [8-3] (Bischoff, 2003).

$$w = (\epsilon, l_{cs}) = (l_{cs})\epsilon \quad [8-3]$$

La simulación se ha de realizar definiendo las propiedades de entrada de los materiales de acuerdo con los resultados experimentales del Capítulo 3. El contenido y el tipo de fibras utilizadas en cada dovela establece el valor de entrada en función de los resultados de la caracterización del material. La Tabla 8.2 presenta las propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras utilizados para ambas dovelas (tanto reforzada con fibra metálica como de polipropileno).

Tabla 8.2 – Propiedades mecánicas de los HRF empleados

Tipo de fibra	E_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R3} [MPa]
Metálica	39600	4,41	5,79	6,23
Polipropileno	36870	4,03	2,88	4,74

Los resultados mostrados en la Tabla 8.2, satisfacen los requisitos referentes a la resistencia en general, donde el E_c y el f_{ct} se sitúan por encima del rango exigido en numerosas aplicaciones estructurales, igualmente con las respuestas postfisuración del material.

La Figura 8.8 muestra las curvas constitutivas a tracción del hormigón, en este caso simulando la tensión – ancho de fisura del hormigón reforzado con fibra plástica, metálica y el hormigón en masa.

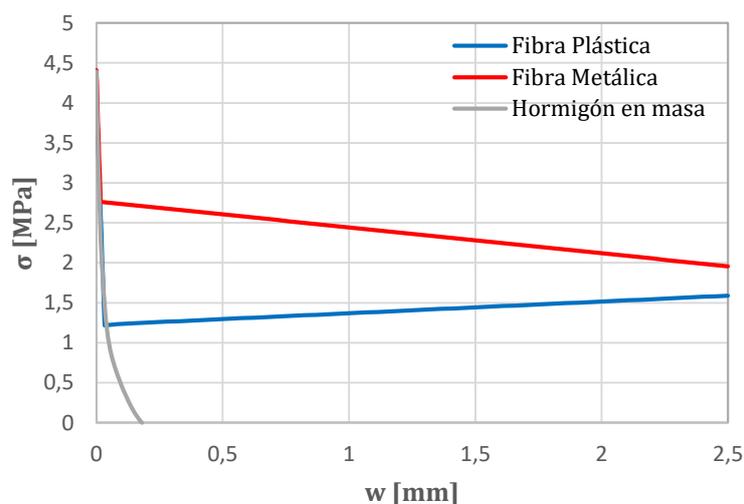


Figura 8.8 – Curvas constitutivas a tracción del hormigón

Una vez presentada la ley constitutiva empleada en este apartado, siguiendo la normativa MC-2010, se procede al ajuste de la curva mediante el análisis inverso, con la finalidad de comparar los resultados numéricos expuestos con los experimentales.

8.4.3. Comparación de los resultados numéricos y los experimentales

La Figura 8.9 presenta las curvas cargas – desplazamiento vertical en el centro del vano, correspondientes a los ensayos experimentales de las dovelas y los modelos obtenidos por el MC-2010.

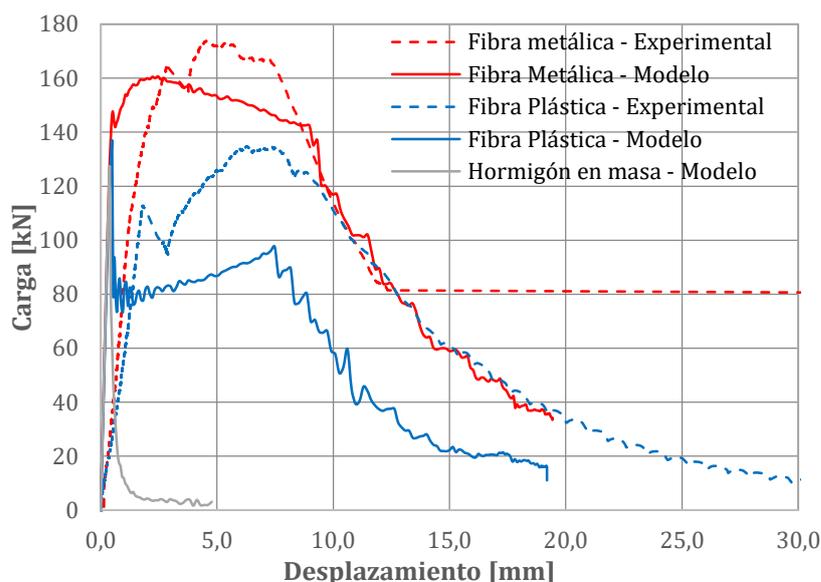


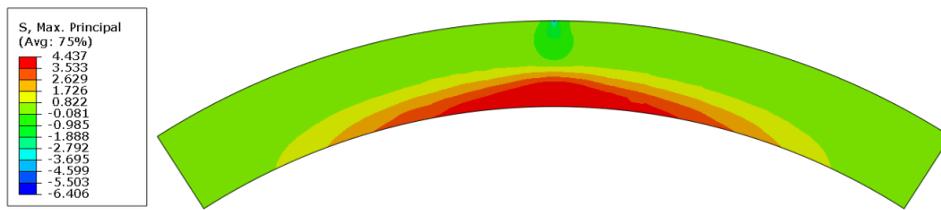
Figura 8.9 – Gráfico carga – desplazamiento de las dovelas

Para ambas dovelas, los resultados de la Figura 8.9 confirman que el modelo numérico desarrollado permite capturar adecuadamente los valores máximos de la capacidad de carga, así como las tendencias de la curva post-fisura. En ambos casos, las ecuaciones constitutivas calibradas de forma inversa, mediante los resultados experimentales son representativas.

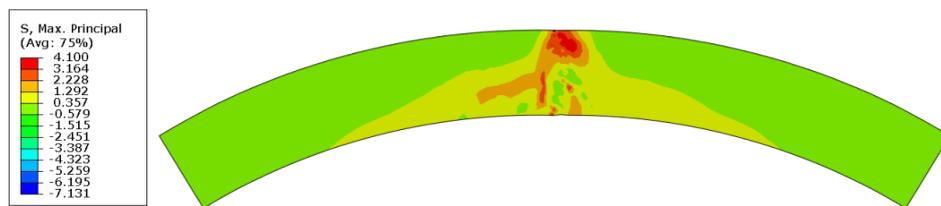
Si bien un cierto grado de desacoplamiento a nivel de desplazamientos debido a que el apoyo en el ensayo real es friccional, condicionando la magnitud del campo de desplazamientos. Por otra parte, en el modelo numérico se ha asumido coacción completa al desplazamiento horizontal en un apoyo y libertad en el otro. Ahora bien, es importante hacer notar que este hecho no afecta la representatividad de la capacidad resistente estimada con el modelo numérico desarrollado.

A continuación la Figura 8.10 y Figura 8.11 se presentan los patrones de tensiones y deformaciones para las cargas de fisuración, y máxima, para la dovela con fibras metálicas y con las fibras plásticas, respectivamente.

Antes de fisuración (145 kN) – Tensiones máximas [MPa]



Final del ensayo – Tensiones máximas [MPa]



Deformaciones plásticas (fisuración)

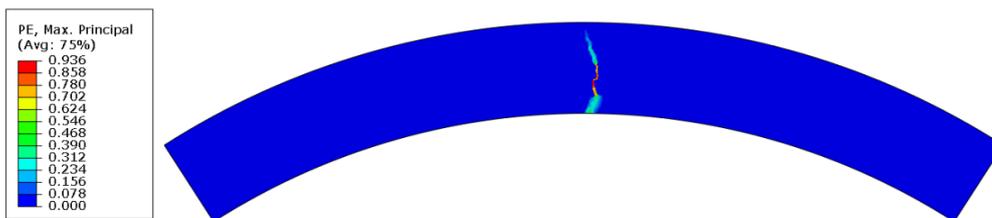
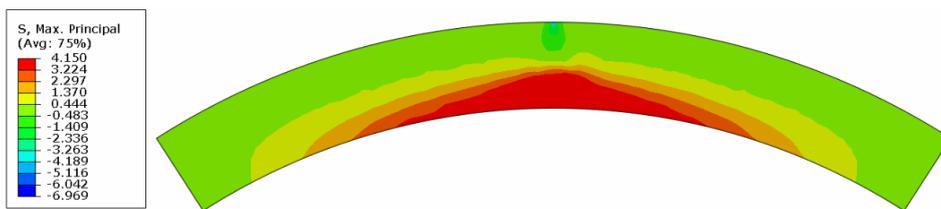
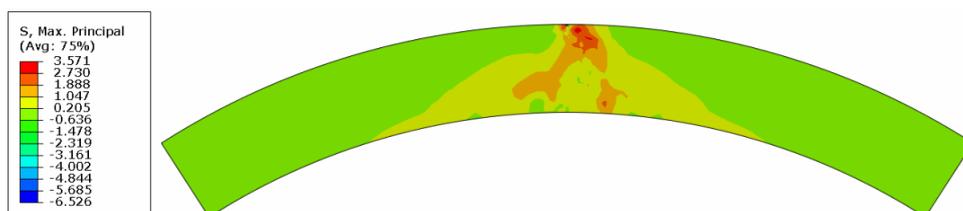


Figura 8.10 – Tensiones principales y deformaciones plásticas para las cargas de fisuración y rotura (mediante fibras metálicas)

Antes de fisuración (137 kN) – Tensiones máximas [MPa]



Final del ensayo – Tensiones máximas [MPa]



Deformaciones plásticas (fisuración)

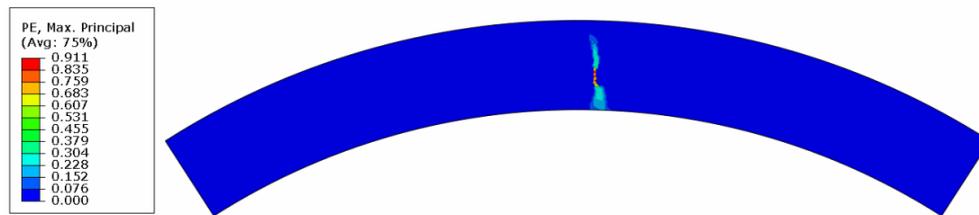


Figura 8.11 – Tensiones principales y deformaciones plásticas para las cargas de fisuración y rotura (mediante fibras de polipropileno)

Referente a las tensiones máximas antes de la fisuración de los elementos (correspondiente a cargas comprendidas entre 137 y 145 kN), los resultados numéricos indicados en la Figura 8.10 y la Figura 8.11 muestran que las tensiones máximas correspondiente al HRFA y HRFP corresponden a valores de 6,41 y 6,97 MPa respectivamente. Por otra parte, una vez finalizado el ensayo, las tensiones máximas correspondiente al HRFA presencia un aumento de la tensión del 11%, mientras que las tensiones máximas correspondientes al HRFP ocurre lo opuesto, presenciando un descenso del 6,8% aproximadamente.

En el caso de ambos elementos, las tensiones alcanzan valores por encima de la resistencia a tracción del hormigón (f_{ct}), antes y después del agrietamiento, prediciendo una alta probabilidad del agrietamiento del hormigón. Afortunadamente, las fibras contribuyen, uniendo las fisuras y a la vez controlando el ancho de la misma.

Finalmente, para ambos elementos las deformaciones plásticas tras la fisuración, se presentan en el centro del vano, donde la carga fue aplicada, mostrando la zona crítica tras ser ensayada.

8.5. CONCLUSIONES

En el presente capítulo se han presentado los resultados referentes a la campaña experimental y la simulación numérica correspondiente a las dovelas de hormigón reforzado con fibras plásticas y con fibras metálicas, realizado con la finalidad de evaluar la viabilidad estructural del hormigón reforzado con fibras plásticas para la construcción de la dovela.

Se ha demostrado la viabilidad estructural de ambas dovelas: reforzada únicamente con un contenido de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno y 40 kg/m³ de fibras metálicas. Las dovelas han demostrado un comportamiento dúctil y a la vez con gran capacidad de redistribuir esfuerzos, manteniendo un alto nivel de carga tras fisuración.

En cuanto a los resultados de flexión de las dovelas a escala real, los resultados obtenidos en la dovela de HRFA son mayores, pero el tipo de comportamiento es muy similar con la de HRFP. A partir de la carga a rotura, se observa un comportamiento “hardening” hasta aperturas de fisura de 1,4 mm, a partir de ahí, para ambos elementos

presenta un descenso de la carga con respuesta dúctil. Para valores cercanos a 1,5 mm el HRFA presenta una carga superior de la dovela de HRFP, correspondiente al 41,1%. Sin embargo, en el caso de aperturas de fisuras correspondientes a 3,5 mm las dovelas de HRFA presenta un valor superior a 48,4% respecto a las de HRFP.

Finalmente, el modelo numérico no lineal de elementos finitos desarrollado, junto con las ecuaciones constitutivas del HRF implementadas, son capaces de estimar las cargas máximas con una precisión adecuada a nivel ingenieril y de diseño.

9. CONCLUSIONES

9.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen las conclusiones principales que se extraen de los diferentes estudios realizados a lo largo de esta Tesis Doctoral. El capítulo ha sido dividido en tres partes correspondientes a las conclusiones generales, conclusiones específicas y en las futuras líneas de investigación.

Las conclusiones generales dan respuesta a los objetivos generales presentados en el *capítulo 1*, los cuales han guiado el desarrollo del presente trabajo. En esta línea, se han estudiado aspectos relativos al diseño, alta durabilidad y la construcción de dovelas a escala real de hormigón reforzado con fibras no metálicas. Con ello se pretende desarrollar un nuevo concepto de dovela prefabricada de alta durabilidad armada únicamente con fibras estructurales no metálicas.

Las conclusiones específicas siguen la secuencia de los trabajos realizados a lo largo de la presente Tesis doctoral y cumplen con diversos aspectos analizados en cuanto a la evaluación del comportamiento del HRFnM a nivel experimental, la implementación de nuevas técnicas de control de calidad del HRFnM, el estudio de la durabilidad frente a agentes externos y la propuesta de diseño de la dovela a escala real.

Finalmente se presentan las futuras líneas de investigación, la cual expone algunas sugerencias para trabajos futuros y así dar continuidad a la investigación realizada.

9.2. CONCLUSIONES GENERALES

El uso del hormigón reforzado con fibras en dovelas de revestimiento para túneles, ya es conocido como una práctica habitual a nivel mundial debido a las numerosas ventajas de este material compuesto. En este contexto, las exigencias estructurales, de durabilidad, y la natural competitividad existente en el mercado de la construcción, ha conducido a que se haya estudiado la idoneidad de otros tipos de refuerzos, distintos a los basados en el acero (fibras y/o barras), en fibras no metálicas, para dar respuesta a estas exigencias.

En el primer tema se ha conseguido obtener un hormigón reforzado con fibras no metálicas que resulta viable para uso estructural destinado para dovelas de revestimiento de túneles. El empleo de las fibras derivadas de la poliolefina en hormigones de alta resistencia con un contenido de 10 kg/m³, presenta los mejores resultados para las propiedades físicas, mecánicas y su respuesta a edades tempranas, considerándolo un hormigón estructural.

Tan importante como la capacidad resistente de las estructuras, es su capacidad para resistir durante su período de vida útil a las agresiones a las que las dovelas están expuestas. Los resultados de los ensayos de durabilidad expuestos en la presente investigación indican que la degradación del material no es significativa referente a las diferentes disoluciones agresivas empleadas, manteniéndose las propiedades mecánicas similares a las iniciales.

Finalmente, se ha desarrollado una propuesta de un concepto de dovela a escala real reforzada únicamente con un contenido de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno, en donde se ha demostrado su viabilidad estructural armada únicamente con fibras estructurales. El ensayo a flexión en escala real ha puesto de manifiesto un comportamiento dúctil de las dovelas tras la fisuración.

9.3. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

9.3.1. Evaluación del comportamiento del HRFnM a nivel experimental

De la Caracterización del hormigón reforzado con fibras no metálicas del *Capítulo 3* se muestran las siguientes conclusiones específicas:

- Para contenidos de fibras del 0,7% en volumen, tanto los hormigones convencionales (HC) como los de alta resistencia (AR) cumplen con los objetivos marcados, satisfaciendo los requisitos referentes a resistencia en general. En cuanto al comportamiento postfisuración presenta una creciente contribución de las fibras tras la rotura de la matriz del hormigón hasta una tensión residual, exceptuando los hormigones diseñados con las fibras de Basalto (B1) y fibra de vidrio (FV1).
- En la 2ª fase de la campaña experimental, para el hormigón con fibras derivadas de la poliolefina de cuantía de 8 kg/m³, se observa que las propiedades físicas no se ven influenciadas significativamente en función de la fibra empleada. A pesar de obtener mayores contenidos de fibras que la 1ª fase de la campaña experimental (contenidos

de 6 kg/m³), la nueva dosificación empleada ha permitido lograr hormigones trabajables, incluso para aumentar la cuantía a dosificaciones de 10 kg/m³ de fibras.

- En cuanto a las propiedades mecánicas, el aumento del contenido de fibras no ha repercutido en los resultados de la resistencia a compresión ni en el módulo de elasticidad, pero si en el comportamiento postfisuración del material, donde a mayor contenido de fibra provoca un aumento de la resistencia residual del material.
- Nuevamente, las fibras derivadas de la poliolefina presentan los mejores resultados en resistencia residual, siendo la fibra de vidrio (FV2) la que presenta el peor comportamiento residual, debido a su geometría y falta de textura superficial, lo que provoca un deslizamiento y falta de anclaje entre la matriz de hormigón y las fibras.
- Finalmente, la 3ª fase correspondientes a hormigones de AR con incorporación de 10 kg de fibras derivadas de la poliolefina por metro cúbico de hormigón cumplen con los requisitos referentes a resistencia en general, siendo la fibra PP4 la que presenta las mejores resistencias residuales.

En el *Capítulo 4* se ha determinado el coeficiente de Poisson de seis macrofibras sintéticas seleccionadas. A partir de la implementación del método experimental, y las medidas del coeficiente de Poisson, los resultados obtenidos extraen las conclusiones que se muestran a continuación:

- A partir de un método basado en la correlación imagen digital en 2D modificado, ha sido posible medir los movimientos longitudinales y transversales de las fibras mediante un sistema de captura de imagen.
- Los resultados del coeficiente de Poisson de los seis tipos de fibras, muestran valores comprendidos entre 0,38 y 0,74. Los valores del coeficiente de variación oscilan del 4% al 13%. Por lo general esta variabilidad es baja, lo cual indica que las mediciones son confiables, en donde las diferencias observadas entre las fibras son estadísticamente significativas.
- La fibra sin relieve (PP3) presenta el menor coeficiente de Poisson, con un valor de 0,38, concordando con los valores comunes descritos en la literatura de acuerdo a las muestras de polipropileno isotrópico. Mientras que las fibras con textura rugosa y de alta curvatura presentan mayores coeficientes de Poisson. Este aumento puede explicarse por distintos factores, pero la hipótesis principal es la distribución del material no uniforme, generado por el relieve de la muestra, lo cual provoca una alteración de las propiedades mecánicas a lo largo de la fibra.

9.3.2. Implementación de nuevas técnicas de control de calidad del HRFnM

Con respecto al control de calidad de las edades tempranas del hormigón, en el *Capítulo 5* se ha estudiado la influencia de las mismas en un hormigón de alta resistencias y con un contenido de fibra de 10 kg/m³. En base a los resultados obtenidos, se pueden derivar las conclusiones específicas descritas a continuación:

- Tras analizar el comportamiento del HRF fabricado, se ha observado su influencia a edades tempranas mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas. Fue posible constatar que tanto para edades tempranas (método de maduración) como para los ensayos a curado convencional en función al control de calidad, el tipo de hormigón empleado es plenamente factible.
- La correlación obtenida en esta investigación, ha proporcionado valores medios de resistencias residuales muy similares a los resultados del ensayo a UNE-EN 14651; Siendo los datos de la correlación inferiores a los resultados de la campaña experimental, indicando que el ajuste obtenido con la correlación empleada es precisa para la dosificación establecida.

Respecto a la campaña presentada en el *Capítulo 6* sobre la determinación del contenido de fibras, puede concluirse:

- En general, las medidas de impedancia eléctrica a 2w no proporcionan una clara revelación de la influencia del contenido de fibras en el HRF, obtenidos a distintos tiempos de curado (corta y mediana edad).
- La edad de las probetas es fundamental para valorar objetivamente la impedancia de la muestra, así como su presencia y contenido en fibras por métodos basados en la espectroscopia de impedancias. A mayor tiempo de curado del hormigón, el máximo incremento respecto a los valores de impedancia eléctrica se produce. Tal circunstancia es producida a consecuencia de que a mayor tiempo de fraguado los poros tienden a cerrarse a una evolución lenta, dificultado el paso de la corriente eléctrica.
- En el HC, las medidas a 4w de impedancia eléctrica a larga edad proporcionan una clara revelación de la influencia del contenido de fibra, donde las muestras en estado seco demuestran que, a mayor contenido de fibra, menor valor de impedancia eléctrica. Por el contrario, el UHPC no proporciona una clara revelación de la influencia del contenido de fibras en el hormigón.
- Todas las muestras en estado mojado (M), muestran una reducción de las medidas de impedancia eléctrica. Este comportamiento es esperable ya que, al sumergirlas, los poros se consideran rellenos de material conductor, y por ende habría un mayor camino de conducción.
- Los resultados mediante la conductividad iónica a 4w han presentado los mejores resultados. Tanto para el HC como para el UHPC, las muestras de larga edad en estado seco (S), proporcionan una clara revelación de la influencia del contenido de fibras.
- En lo que respecta a las medidas de impedancia eléctrica mediante la célula de medida capacitiva, evidencian que el hormigón con fibras presenta para todos los casos, valores superiores ante los resultados del hormigón sin fibras.

9.3.3. Estudio de la durabilidad frente a agentes externos

Tan importante como la capacidad resistente de las estructuras, es su capacidad para resistir durante su período de vida útil a las agresiones a las que las dovelas están expuestas. Por ello, el *Capítulo 7* presenta un estudio de la durabilidad de las fibras plásticas frente a agentes externos. De los resultados obtenidos se extraen las conclusiones que se muestran a continuación:

- Se han determinado las propiedades mecánicas básicas y las características físico-químicas superficiales de las fibras. Esta caracterización se ha realizado para el estado inicial no degradado, como tras someter a los hilos madre a siete disoluciones agresivas, provenientes de las sales, ácidos y básico.
- Los resultados de la determinación de las propiedades mecánicas indican que la degradación del material no es significativa, manteniéndose sus propiedades mecánicas (ensayo a tracción y módulo de elasticidad) y características superficiales similares a las iniciales. Las variaciones en la resistencia a tracción y módulo están de media en un 10-15 % de reducción.
- En cuanto a la determinación de las propiedades físicas, en los resultados del estudio SEM no se observan indicios de degradación de la muestra; sí que para el caso de las condiciones alcalinas se observa un ligero teñido superficial de la muestra y, por ende, intuir un posible inicio de degradación, pero dicha teoría pierde credibilidad al compararla con la influencia de la tensión última, donde en este caso tras ser atacada, no se han visto influenciada en la resistencia a tracción.
- Los ensayos de la espectroscopia Raman no indican una alteración en las características de las fibras. Por lo tanto, los ensayos realizados avalan la alta durabilidad de las fibras de poliolefina cuando se las somete a diferentes agentes agresivos.

9.3.4. Propuesta de diseño de la dovela a escala real

En el *Capítulo 8* se ha realizado una propuesta de dovela a escala real reforzada con fibras derivadas de la poliolefina y la segunda reforzada con fibras de acero, con el fin de analizar su comportamiento a flexión. De este capítulo se pueden extraer las conclusiones siguientes:

- Se ha demostrado la viabilidad estructural de las dovelas reforzada únicamente con un contenido de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno y 40 kg/m³ de fibras metálicas. Las dovelas han demostrado un comportamiento dúctil y a la vez con gran capacidad de redistribuir esfuerzos, manteniendo un alto nivel de carga tras fisuración.
- Los resultados obtenidos a flexión obtenidos en la dovela reforzada con fibras metálicas son mayores, pero el tipo de comportamiento es muy similar con la reforzada con polipropileno. En ambos casos las fibras son capaces de soportar una carga superior a la de rotura del hormigón hasta una apertura de fisura de 6 mm, apertura muy superior al que se tiene que medir en los ensayos exigidos por los

pliegos de las obras (3.5 ó 3.0 mm), a partir de ahí, para ambos elementos presenta un descenso de la carga con respuesta dúctil.

- Finalmente, el modelo numérico no lineal de elementos finitos desarrollado, junto con las ecuaciones constitutivas del HRF implementadas, son capaces de estimar las cargas máximas con una precisión adecuada a nivel ingenieril y de diseño.

9.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La presente Tesis Doctoral ha exhibido un gran avance relacionado al diseño y alta durabilidad del hormigón reforzado con fibras no metálicas, surgiendo otros aspectos en los cuales resulta de gran interés profundizar. Teniendo esto en consideración, se presentan algunas posibles líneas de investigación con la intención de dar continuidad al trabajo realizado.

En cuanto a la evaluación del comportamiento del HRFnM a nivel experimental se propone:

- Optimizar las dosificaciones de hormigón a partir de la implementación de fibras híbridas (acero y derivadas de la poliolefina) como refuerzo de hormigón.
- Ampliar el estudio a otros tipos y contenidos de fibras existentes en el mercado como: Aramida (FA), Polivinilalcohol (PVA) y de carbono (FC).
- Realizar ensayos de fibras embebidas en el hormigón, con la intención de evaluar y profundizar en el comportamiento de la adherencia fibra-matriz cementicia.
- Referente a la determinación del coeficiente de Poisson se recomienda realizar una validación de la deformación transversal a través de técnicas con tecnología láser.

Por otro lado, ha sido factible la implementación de técnicas de control de calidad del HRFnM. Sin embargo, hay aspectos en los que profundizar los cuales serían interesantes analizar:

- Respecto a la determinación del contenido de fibras, a partir de las mediciones de impedancia eléctrica, desarrollar un método de control que combine la fiabilidad y simplicidad con la determinación de la cuantía y a la vez la orientación de las fibras plásticas.

En cuanto al estudio de la durabilidad frente a agentes externos a partir del hilo madre se propone:

- Profundizar en el conocimiento de la durabilidad de fibras no metálicas en matrices cementicias, proporcionando ecuaciones simplificadas para estimar la misma.
- Desarrollar nuevas matrices cementicias de durabilidad optimizada para asegurar su durabilidad en el entorno 100 – 150 años.

Finalmente, respecto al estudio de la dovela a escala real, es de gran interés profundizar en aspectos de distinta índole:

-
- A partir de la prueba piloto de las dovelas a escala real, proponer una extracción de testigos para caracterizar su comportamiento mediante ensayos de las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad.
 - Optimizar los sistemas de cálculo estructural para facilitar la sustitución de refuerzos tradicionales por fibras no metálica.
 - Caracterización del comportamiento del HRF no metálicas frente a las acciones de fuego y su comportamiento una vez que la acción ha cesado (post fuego).

BIBLIOGRAFÍA

- A. Bunsell (Ed.). (2009). *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres*. Woodhead Publishing Series in Textiles and CRC Press LLC.
- A, A., Jao, B., & Cunha, V. (2013). Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cem Concr Res. Cement and Concrete Research*, 51, 57–66.
- Abbas, S., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2014). Mechanical performance of RC and SFRC precast tunnel lining segments : A Case Study Mechanical Performance of Reinforced Concrete and Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Tunnel Lining Segments : A Case Study, (September).
- Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). High-performance fiber-reinforced concrete : a review. *Journal of Materials Science*, 51.
- AK, J. (1992). The universal dielectric response and its physical significance. *Tions on Electrical Insulation*, 27(3), 407–423.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2016). Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete : Study of the influence of the concrete properties , casting procedures , the fibre length and specimen size. *ENGINEERING FRACTURE MECHANICS*, 154, 225–244.
- Aranda, P. L. (2014). *Efecto de la adición de Hidróxido Cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante*.
- ASTM C-1550. (2012). Standard Test Method for Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete (Using Centrally-Loaded Round Panel). *American Society for Testing and Materials*, 1550, 2012.
- ASTM C1557-03. (2008). Standard test method for tensile strength and young's modulus for fibres. West Conshohocken, PA: ASTM; *American Society for Testing Materials*, 2008.
- ASTM C1609. (2007). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). In *ASTM International*, West Conshohocken.
- ASTM C1609. (2008). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), i, 1–9.
- Babafemi, A. J., & Boshoff, W. P. (2015). Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading. *CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*, 55, 62–69.
- Balázs, G. L. et al. (2017). Observation of steel fibres in concrete with Computed Tomography. *Construction and Building Materials*, 140, 534–541.

- Banhöfer, B. (2006). Analytical evaluation of pull-out tests — The inverse problem. *Cement and Concrete Composites*, 28, 564–571.
- Banthia N. (1994). ACI SP-142 Fiber Reinforced Concrete Developments and Innovation (Vol. 91, p. 119).
- Barnett, S. J. et al. (2010). Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Materials and Structures*, 43(7), 1009–1023.
- Barr, P. B. I. G., Lee, M. K., Barragdn, B., Dupont, D., Gettu, R., Olesen, J. F., ... Vandewalle, L. (2003). Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF uni-axial tensile test : Part I Test method evaluation. *Materials and Structures*, 36(May), 265–274.
- BE., B. (2002). *Failure and toughness of steel fibre reinforced concrete under tension and shear. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.*
- Bentur A. et al. (1985). Pull-out processes in steel fibre reinforced cement. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 7, 29–37.
- Bernard, E. S. (2000). Behaviour of round steel fibre reinforced concrete panels under point loads. *Materials and Structures*, 33(April), 181–188.
- Bischoff, P. (2003). Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete. *Materials in Civil Engineering*, 15(2), 1745–182.
- Blanco, A., Pujadas, P., De la Fuente, A., & Cavalaro, S. H. P. (2016). Influence of the type of fiber on the structural response and design of FRC slabs. *Structural Engineering*, 142(9)(04016054).
- Bostr, L. (2006). Concrete for Tunnel Linings Exposed to Severe Fire Exposure. *Springer Science*, 351–362.
- Buil, M., & Acker, P. (1985). Creep of a silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, 15(3), 463–466.
- Buratti, N., Mazzotti, C., & Savoia, M. (n.d.). Long-Term Behaviour of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete Beams, 439–450.
- Buratti, N., Mazzotti, C., & Savoia, M. (2011). Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2713–2722.
- Burgers, R., & Walraven, J. (2007). Structural behavior of SFRC tunnel segments during TBM operations, 1461–1468.
- Cáceres, A. R. E., Galobardes, I., & Figueiredo, A. D. de. (2016). Mechanical Characterization of Synthetic Macrofibres. *Materials Research*, 19(3), 711–720.
- Campbell JE. (1990). Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at one to fifty Megahertz. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 332–341.
- Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8, No(1), 679–698.
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., & Romualdi, P. (2011). Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 26(2), 284–291.
- Carmona, S., Aguado, A., Borrell, C. M., & Contreras, M. C. (2009). Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona) Quality control of fiber reinforced concretes by mean of double pushing test (barcelona test), 24, 119–140.
- Carmona, S., Aguado, A., & Mora, F. (2016). Distribution of fibers in SFRC segments for tunnel linings.

Tunnelling and Underground Space Technology, 51, 238–249.

- Cavalaro, S. H. P., López-Carreño, R., Torrents, J. M., Aguado, A., & Juan-García, P. (2016). Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical SFRC specimens. *Materials and Structures*, 49, 2016.
- Cavalaro, S. H. P., López, R., Torrents, J. M., & Aguado, A. (2015). Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC. *Materials and Structures*, 48, 2015.
- Cengiz, O., & Turanlı, L. (2004). Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Proceedings of the 8th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Challenges and Opportunities (BEFIB 2012), Portugal, Barros Ed., 34*, 1357–1364.
- Chan, Y., & Chu, S. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 1167–1172.
- Chen, B., Wu, K., & Yao, W. (2004). Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement Concr. Compos.*, 26(4), 291–297.
- Chen, W. F. (1970). Double punch test for tensile strength of concrete. *ACI Materials Journal*, 67(2), pp. 67, 993–995.
- Conforti, A., Plizzari, G., & Tiberti, G. (2017). Comparing test methods for the mechanical characterization of fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 19(3), 656–669.
- Conforti, A., Tiberti, G., Plizzari, G. A., Caratelli, A., & Meda, A. (2017). *Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*. Elsevier Ltd.
- Conforti, A., Trabucchi, I., Tiberti, G., Plizzari, G. A., Caratelli, A., & Meda, A. (2019). Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers. *Engineering Structures*, 199(September), 109628.
- D. A. Skoog y James J. Leary. (1991). Análisis instrumental, Cuarta edición. Mc Graw Hill., 1991.
- Dal Lago, B., Taylor, S. U. E., Deegan, P., Ferrara, L., Sonebi, M., Crosset, P., & Pattarini, A. (2017). Full-scale testing and numerical analysis of a precast fibre reinforced self-compacting concrete slab pre-stressed with basalt fibre reinforced polymer bars. *Composites Part B*, 128, 120–133.
- de la Fuente A, Pujadas P, Blanco A, A. A. (2011). Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), 60–71.
- de la Fuente, A., Blanco, A., & Pujadas, P. (2014). Diseño óptimo de dovelas de hormigón reforzado con fibras para el revestimiento de túneles. *Science Direct*.
- De, P. (1996). Eurocódigo 2.
- Di Prisco, M., Ferrara, L., & Lamperti, M. G. (2013). Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 46(11), 1893–1918.
- Di Prisco M, Tomba S, Bonalumi P, M. A. (2015). On the use of macro synthetic fibres in precast tunnel segments. In *Proceedings of the International Conference Fibre Concrete 2015. Czech Republic*. (pp. 478–483).
- Di Prisco, M., Lamperti, M. G. L., & Lapolla, S. (2010). Double-edge wedge splitting test. *Proceedings of the Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FramCoS 7), Jeju, Korea, Oh Ed.*, 1533–1540.
- Di Prisco, M., & Plizzari, G. A. (2009). Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 1261–1281.

- DIN 1048-5:1991. (n.d.). Testing Concrete - Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould). In *German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung)*.
- Dupont D, V. L. (2005). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composite*, 27(3), 391–398.
- Fernández, M. (2003). Hormigones con fibras: tecnología y propiedades generales. In *Hormigón y Acero*, nº. 228-229, 2º y 3er trimestre (pp. 167–176).
- Ferrara, L., Faifer, M. & Toscani, S. (2012). A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites— part 1: method calibration. *Materials and Structures*, 45(4), 575–589.
- Ferrara, L., & Meda, A. (2007). Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Materials and Structures*, 39(4), 411–420.
- Ferrara, L., Ozyurt, N., & Prisco, M. (2011). High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites : the role of “ casting-flow induced ” fibre orientation. *Materials and Structures*, 44(1), 109–128.
- FIB Model Code. (2010). Fibre Reinforced Concrete. First complete draft. In *International Federation for Structural Concrete, Switzerland*.
- Galeote, E. (2018). *Optimization of design procedures and quality control for FRC*.
- Galeote, E., Blanco, A., Cavalaro, S. H. P., & Fuente, A. De. (2017). Correlation between the Barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 152, 529–538.
- García, T., Agulló, L., Aguado, A., & Canals, G. (2004). Evaluación de la tenacidad en el hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de alto módulo, 555, 552–555.
- Gersing, E. (1991). Measurement of electrical impedance in organs measuring equipment for research and clinical applications. *Biomed Tech.*, 35, 6–11.
- Giraud G, Laugier JM, Clerc J, R. J. (1984). AC Conductivity of a Random Medium: A Percolation Approach. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 19(3), 205–209.
- Gong, C., Ding, W., Mosalam, K. M., Günay, S., & Soga, K. (2017). Comparison of the structural behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete tunnel segmental joints. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68(May), 38–57.
- González, D., & Josep M. Torrents. (2011). *Detección de fibras plásticas en probetas de hormigón*.
- Guillermo Pérez. (n.d.). Espectrometría Raman. Retrieved from https://www.espectrometria.com/espectrometra_raman
- H., K. (1975). *Fibre spacing and specific fibre surface*. In: Neville A, editor. *Fibre reinforced cement and concrete*.
- Hartl, A. M., Jerabek, M., & Lang, R. W. (2015). Anisotropy and compression / tension asymmetry of PP containing soft and hard particles and short glass fibers. *EXPRESS Polymer Letters*, 9(7), 658–670.
- Hernández Murcia, D. F. (2017). *Estudio de concreto adicionado con fibras de polipropileno o sintéticas al 2%*. Universidad Católica de Colombia. Universidad Católica de Colombia.
- Hippel AR. (n.d.). *Dielectric Materials and Waves*. Artech House Boston.
- Hippel AR. (1995). *Dielectric Materials and Applications*. Artech House Boston.

- Hu, Z., Xie, H., Hua, T., Wang, Z., Hu, Z., Xie, H., ... Wang, Z. (2009). Advanced intensity correlation method for evaluating Poisson ' s ratio of fiberlike material *Advanced intensity correlation method for evaluating Poisson ' s ratio of fiberlike material*, *013105*(2009).
- IBN. NBN B 15-238. (1992). Essais des bétons renforcés de fibres — Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques. *Institut Belge de Normalisation Brussels, Brussels*, 238, 1992.
- Ismail, S., Nath, H., Popov, I., & Beaugrand, J. (2016). Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites. *American Concrete Institute*, *19*(4), 2043–2050.
- Kang, S. T. et al. (2011). The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. *Const*, *25*(5), 2450–2457.
- Karliński, J., Eugeniusz Rusiński, & Lewandowski, T. (2008). New generation automated drilling machine for tunnelling and underground mining work, *17*(April 2019), 224–231.
- Kaundinya, I. (2005). Protection of road tunnel linings in cases of fire.
- Klein, N. S., Fuente, A. De, Aguado, A., & Masó, D. (2011). Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation, *61*(302), 239–256.
- Kooiman AG. (2000). *Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design*. Delft University of Technology.
- KR., F., & HP., S. (1989). Dielectric Properties of Tissues and Biological Materials. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, *17*(1), 25–104.
- Lappa, L. (2007). High Strength Fibre Reinforced Concrete: Static and fatigue behavior in bending.
- Lataste, J.F., Behloul, M. & Breysse, D. (2008). Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT & E International*, *41*(8), 638–647.
- Lataste, J. F. et al. (2009). Determination of fibres orientation in UHPFRC and evaluation of their effect on mechanical properties. In *7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes (France)* (p. 2009).
- Liao, L. (2015). Structural design and characterisation of FRC precast segments, (September).
- Lim, S. et al. (2018). Structural behavior prediction of SFRC beams by a novel integrated approach of X-ray imaging and finite element method. *Construction and Building Materials*, *170*, 347–365.
- Liu, X., Ye, G., Schutter, G. De, Yuan, Y., & Taerwe, L. (2008). On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cement and Concrete Research*, *38*, 487–499.
- Lo, F., Felicetti, R., Meda, A., & Bortolussi, A. (2019). Assessment of concrete sensitivity to fire spalling : A multi-scale experimental approach. *Construction and Building Materials*, *212*, 476–485.
- Luis Coto. (2007). *Ecuaciones constitutivas para el análisis de secciones de HRFA*.
- MA. Sutton, J.J, Orteu, H. S. (2009). Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. In *Springer, New York*.
- Major, M. J. D. T. Z., & Lang, K. R. R. W. (2010). Relaxation behavior of neat and particulate filled polypropylene in uniaxial and multiaxial compression. *Mech Time-Depend Mater* *14*, 47–68.
- Markovic, I. (2006). *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete: Development and Utilisation*.
- Mcclung, A. J. W., Tandon, G. P., Goecke, K. E., & Baur, J. W. (2011). Non-contact technique for

- characterizing full- field surface deformation of shape memory polymers at elevated and room temperatures. *Polymer Testing*, 30(1), 140–149.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials. 2006. In *McGraw-Hill 3rd Edition* (p. 2006).
- Meng, W. & Khayat, K. H. (2017). Improving flexural performance of ultra-high- performance concrete by rheology control of suspending mortar. *Composites Part B: Engineering*, 117, 26–34.
- 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), 42, 415–425.
- Naaman, A. E., Namur, G. G., Alwan, J. M., & Najm, H. S. (1991). Fibre Pullout and Bond Slip. I: Analytical Study. *Journal of Structural Engineering*, 117, 2769–2790.
- Naaman, A. E. (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Cement Composites. Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 241–252.
- Naaman, A. E. (2012). Fiber to matrix bond mechanisms in FRC composite. *Barros JAO, Editor. 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Challenges and Opportunities (BEFIB 2012), RILEM Publications SARL*, 598–610.
- Nadelman, E.I., and Kurtis, K. . (2014). A Resistivity-Based Approach to Optimizing Concrete Performance. *Concrete International*, 36(5), 50–54.
- Nobuyuki Otsu. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. , *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Nunes, S., Pimentel, M. & Carvalho, A. (2016). Non-destructive assessment of fibre content and orientation in UHPFRC layers based on a magnetic method. *Cement and Concrete Composites*, 72, 66–79.
- Nunes, S. et al. (2017). Estimation of the tensile strength of UHPFRC layers based on nondestructive assessment of the fibre content and orientation. *Cement and Concrete Composites*, 83, 222–238.
- Ozyurt N, Mason TO, S. S. (2006). Non-destructive monitoring of fibre orientation using AC-IS: an industrial-scale application. *Cement and Concrete Research*, 36, 1653–1660.
- Panchawagh HV, Sounart TL, M. R. (2009). A Model for Electrostatic Actuation in Conducting Liquids. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(5), 1105–1117.
- 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 WalravenStoelhost. fib Symposium “Tailor Made Concrete Structures”. Amsterdam: Taylor & Francis, Group, p. 507–512.
- Phys, J. C., Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and Absorption in Dielectrics I . Alternating Current Characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 9(4), 341–351.
- Ponikiewski, T. et al. (2015). X-ray computed tomography harnessed to determine 3D spacing of steel fibres in self compacting concrete (SCC) slabs. *Construction and Building Materials*, 74, 102 – 108.
- Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., de la Fuente, A., et al. (2014). Fibre distribution in macroplastic fibre reinforced concrete slab-panels. *Construction and Building Materials*, 64, 496–503.
- Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S. H. P., De La Fuente, A., & Aguado, A. (2014). Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation of FRC. *Construction and Building Materials*, 214–224.
- Pujadas, P. (2013a). *Caracterización y diseño del homigón reforzado con fibras plásticas*. Retrieved

from

- Pujadas, P. (2013b). *Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas*.
- Pujadas, P., Blanco, A., Fuente, A. de la, & Aguado, A. (2013). Cracking behavior of FRC slabs with traditional reinforcement. *Materials and Structures*, 43 (10), 707–725.
- R.H. Pritchard, P. Lava, D. Debruyne, E. M. T. (2013). Precise determination of the Poisson ratio in soft materials with 2D digital image correlation, *Soft Matter*, 9(26).
- Rebaza, J. V. (2014). Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny, (December).
- RILEM/TC-ACS/11/27. (2011). RILEM RECOMMENDED TEST METHOD: AAR-3. Detection of potential alkali-reactivity - 38°C test method for aggregate combinations using concrete prisms, 1–18.
- RILEM TC 162-TDF. (2003). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete re design method: final recommendation. *Materials and Structures*, 36(262), 560–567.
- Robins, P.J., Austin, S.A. & Jones, P.A. (2003). Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete. *Magazine of Concrete Research*, 55(3), 225–235.
- Roqueta G, Jofre L, Romeu J, B. S. (2011). Microwave time-domain reflection imaging of steel fibre distribution on reinforced concrete. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(12), 3913–3922.
- Saludes, S. (2007). Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras. Tesina de especialidad, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2007.
- Segura-castillo, L., Monte, R., & Figueiredo, A. (2018). New Test for the Characterization of the Tensile Constitutive Behaviour of FRC. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet Springer International Publishing*, 1, 382–389.
- Segura, I., Torrents, J. M., Aguado, A., & Faneca, G. (2018). Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres. *Cement and Concrete Composites*.
- Sideris, K. K., Manita, P., & Sideris, K. (2004). Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. *Cement and Concrete Composite*, 26, 623–631.
- Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6–7), 504–512.
- Soroushian P, L. C. (1990). Distribution and orientation of fibres in steel fibre reinforced concrete. *ACI Mater J*, 87(5), 433–439.
- Suorineni, F. T., Kaiser, P. K., & Henning, J. G. (2008). Safe rapid drifting – Support selection. *Science Direct*, 23, 682–699.
- Švec, O. et al. (2014). Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. *Cement and Concrete Composites*, 50, 60–72.
- Tobio, J. M. (1967). Ensayos no destructivos: Métodos Aplicables a la Construcción. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento., 29(9).
- Torrents J, Blanco A, Pujadas P, Aguado A, Juan-García P, S.-M. M. (2012). Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibres in concrete. *Materials and Structures*, 45(10), 1–16.
- Torrents JM, Juan-García P, Patau O, A. A. (2009). Surveillance of steel fibre reinforced concrete slabs measured with an open-ended coaxial probe. In *Proceedings of the XIX IMEKO world congress: fundamental and applied metrology, Lisbon, Portugal* (pp. 2282–2284).

- Tscharnutter, D., Jerabek, M., Major, Z., & Lang, R. W. (2011). Time-dependent poisson ' s ratio of polypropylene compounds for various strain histories. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 15 (1), 15–28.
- Tschegg, E. K., & Linsbauer, H. N. (1986). Testing procedure for determination of fracture mechanics parameters, Patentschrift no. A-233/86, Österreichisches Patentamt., 1986.
- UNE-EN 12350-2:2009. (2009). Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento, 12350.
- UNE-EN 12350-6:2009. (2009). Determinación de la densidad.
- UNE-EN 12350-7:2010. (2004). Ensayos de hormigón fresco, Determinación del contenido de aire.
- UNE-EN 12390-13:2014. (2014). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión, 12390.
- UNE-EN 12390-3. (2009). Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens, 20.
- UNE-EN 14651:2007. (2008). Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).
- UNE-EN 83515:2010. (2009). Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona.
- UNE-EN 83966:2008. (2008). Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad.
- UNE-EN 83980:2014. (2014). Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, densidad y la porosidad accesible al agua de hormigón.
- UNE-EN 83982:2008. (2008). Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido.
- UNE-EN ISO 13934-1:2013. (2013). Textiles. Propiedades de los tejidos frente a la tracción. Parte 1: Determinación de la fuerza máxima y del alargamiento a la fuerza máxima por el método de la tira. (ISO 13934-1:2013).
- UNI 11039. (2003). Calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio; Parte I: Definizioni, classificazione e designazione; Parte II: Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degle indici di duttilità.
- Van Brakel J, M. S. y S. M. (1981). Mercury porosimetry: state of art. *Powder Technology*, 29, 1–12.
- Vandewalle L, Heirman G, V. R. F. (2008). Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete. In *Proceedings of the 7th RILEM symposium on fibre reinforced concrete: design and applications (BEFIB). Chennai, India; 2008.* (pp. 719–728).
- Vandewalle, L. (2000). Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers, 33(April), 164–165.
- Vandewalle, L. (2006). (2006). Hybrid Fiber Reinforced Concrete: Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties. In Konsta-Gdoutos., Springer Netherlands, p. 77–82.
- Walraven, J. C. (2009). High performance fiber reinforced concrete : progress in knowledge and design codes, 1247–1260.
- Wen, S., & Chung, D. D. L. (2006). The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement, 44, 2130–2138.

- Won, J., Hong, B., Lee, S., & Jin, S. (2013). Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, *102*, 101–109.
- Woo, L. Y. et al. (2005). Characterizing fiber dispersion in cement composites using AC Impedance Spectroscopy. *27*(6). *Cement and Concrete Composites*, *27*(6), 627–636.
- Yazdani-chamzini, A., & Haji, S. (2012). Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, *30*, 194–204.
- Zare, S., & Bruland, A. (2006). Comparison of tunnel blast design models. *Science Direct*, *21*, 533–541.
- Zhang, S. et al. (2018). Experimental and analytical study of the fibre distribution in SFRC: A comparison between image processing and the inductive test. *Composite Structures*, *188*(December 2017), 78–88.
- Zhou, B. & Uchida, Y. (2017). Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC. *Cement and Concrete Research*, *95*, 164–177.
- Zornoza, E., Andrade, C., & Garce, P. (2015). Electronic and Electrolytic Conduction of Cement Pastes with Additions of Carbonaceous Materials. *Springer International*, 11–13.

APÉNDICE A – FORMULACIONES DEL HORMIGÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE MEZCLA

A1.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de cualquier tipo de hormigón implica conocer bien los materiales que se van a emplear, y utilizarlos en las proporciones adecuadas para obtener una mezcla con las características necesarias para el fin al que va a destinarse, como son trabajabilidad, consistencia, durabilidad, resistencia, etc.

En el caso del hormigón para dovelas con fibras no metálicas, además de tener que cumplir los requisitos de un hormigón de una resistencia y durabilidad determinadas, es necesario que las fibras se acoplen bien en la mezcla para conseguir que esta sea trabajable y pueda ponerse en obra adecuadamente. En este documento se presentan los diferentes estudios y pruebas realizados para obtener mezclas que cumplan con todas las exigencias particulares que exige un hormigón para dovelas con fibras no metálicas.

A.1.2 CARACTERÍSTICAS QUE DEBE CUMPLIR UN HORMIGÓN PARA DOVELAS

El HRF debe cumplir una serie de características para que su puesta en obra sea adecuada y para que las fibras se acoplen bien a la mezcla.

Generalmente se piden resistencias a compresión medio-elevadas, en el entorno de los 40-60 MPa. Esto exige que haya que ir a contenidos de cemento superiores a los 350 kg/m³. Además, suelen tener exigencias también de durabilidad (ser resistentes a agentes agresivos), lo que implica ir a contenidos de cemento altos y de agua bajos para crear unas estructuras poco porosas que sean difíciles de atacar.

En cuanto a los áridos, es necesario diseñar una mezcla en la que se consigan curvas de áridos continuas y compactas, para facilitar el obtener altas resistencias en el hormigón. Se pueden tomar como referencia los husos ACI, la curva de máxima compacidad Fuller u otros.

La consistencia de puesta en obra del hormigón para dovelas debe ser seca-plástica, ya que la forma de los moldes y el vibrado enérgico que sufre el hormigón no permite colocarlo en consistencias más blandas.

Por otro lado, es importante tener en cuenta el tipo, forma y dimensiones de la fibra que se vaya a mezclar con el hormigón, ya que cada una de ellas está constituida por diferentes compuestos que pueden favorecer o dificultar el mezclado. Las fibras deben quedar perfectamente inmersas en la matriz del hormigón para que su adherencia sea máxima. Cuantos más huecos se generen entre la fibra y dicha matriz, peor será el comportamiento del HRF, ya que habrá menos adherencia entre la fibra y la matriz cementicia. Esto conlleva un peor comportamiento en cuanto a la resistencia residual del HRF. Esta tesis doctoral surge a partir de una dosificación inicial tipo, y con ella se van a mezclar diferentes tipos de fibras.

A.1.3 ÁRIDOS EMPLEADOS

En el caso de las dosificaciones de la caracterización del hormigón reforzado con fibras no metálicas, todos los estudios se han realizado con los áridos calizos de la cantera que Promsa tiene en Sant Vincenç dels Horts, en Barcelona. Son áridos producidos tras un proceso de machaqueo en la cantera a partir del material de voladura, por lo cual todas sus caras son trituradas.

Dado que estos áridos están validados para su uso en hormigones, sólo se han realizado los ensayos principales que se necesitan para poder dosificar la mezcla adecuadamente. Estos son granulometrías, equivalente de arena, peso específico y absorción. Los resultados obtenidos han sido:

Tabla A1.1 – Ensayo de Granulometría

MATERIAL	PROCEDENCIA	25	20	16	14	12.5	10	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
4/10 mm calizo	PROMSA					100	98	69	4.8	3	2.1	1.4	0.8	0.6	0.4
10/20 mm calizo	PROMSA	100	98	82	68	51	18	1.9	0.6						
0/4 mm calizo	PROMSA								100	98	69	36	21	14	10.8

Tabla A1.2 – Ensayo de EA, pesos específicos y absorción de los áridos

MATERIAL	PROCEDENCIA	EA	P.ESP. APARENTE	P.E. SUP SAT.SECA	P.E REAL	ABSORCIÓN
4/10 mm calizo	PROMSA		2.649	2.673	2.715	0.92
10/20 mm calizo	PROMSA		2.656	2.676	2.711	0.77
0/4 mm calizo	PROMSA	77	2.627	2.655	2.703	1.07

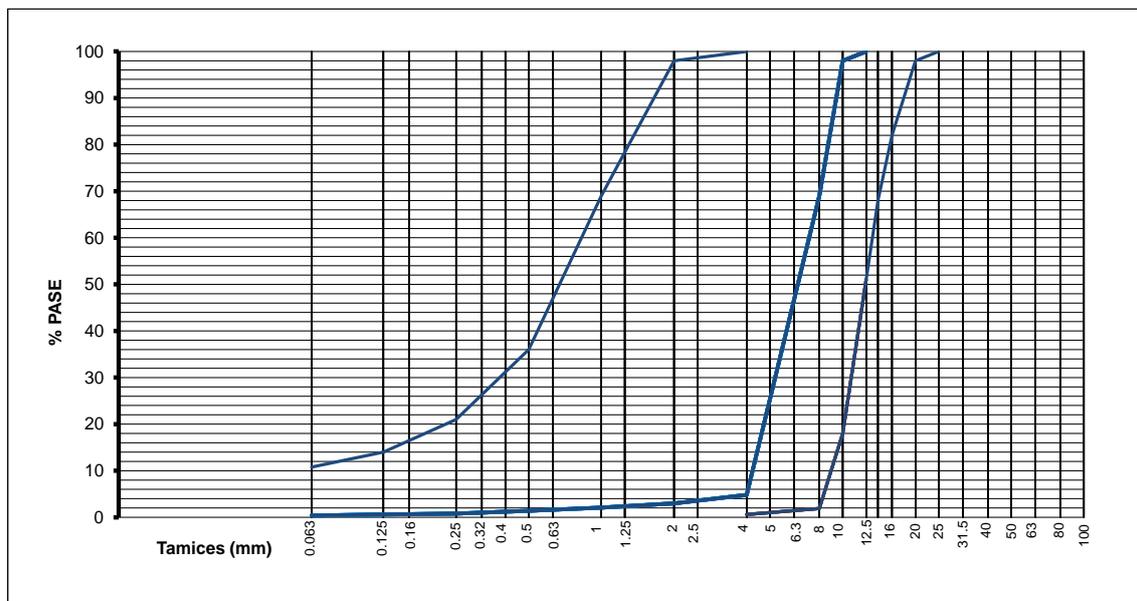


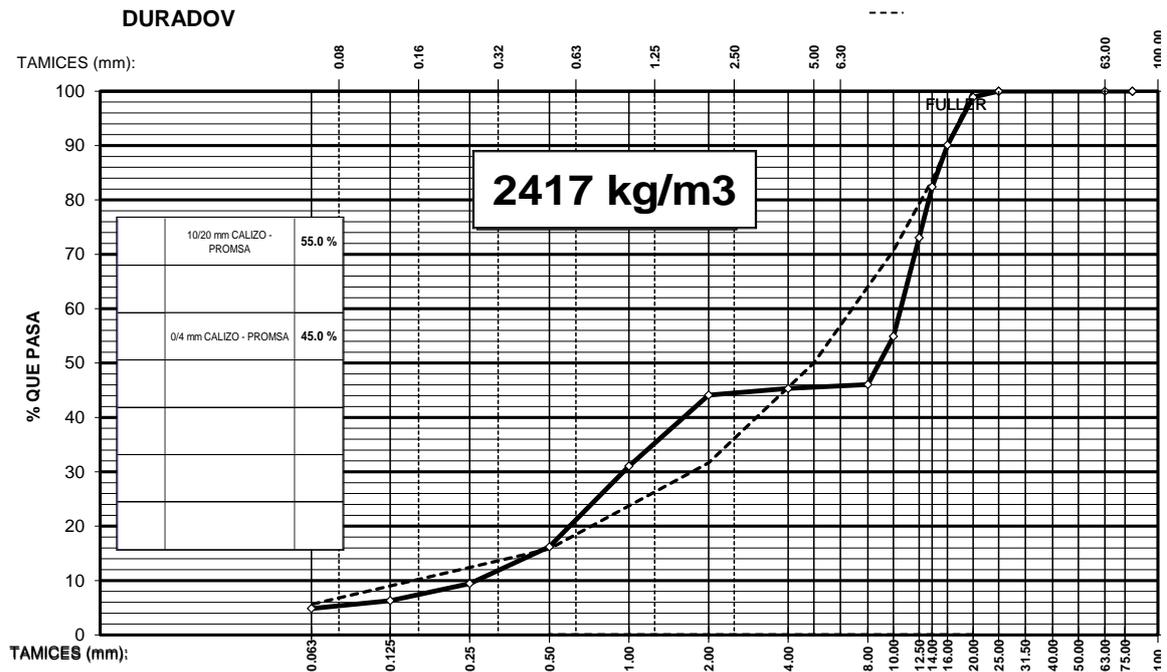
Figura A1.1 – Huso granulométrico de los áridos empleados

A1.1.1 Granulometría FASE I

Se han preparado dos dosificaciones, una convencional (HC) y otra de alta resistencia (HAR) para comprobar las diferencias en resistencia residual del hormigón con fibras. Se tomaron como referencia las curvas de trabajo que habitualmente utilizan las plantas de hormigón de la zona.

La dosificación correspondiente al hormigón convencional se ha diseñado eliminando la fracción 4/10 mm del árido calizo, para crear una curva discontinua que permitiera crear hueco para el acomodo de las fibras. La curva de áridos creada, tomando la de Fuller como referencia, es la siguiente:

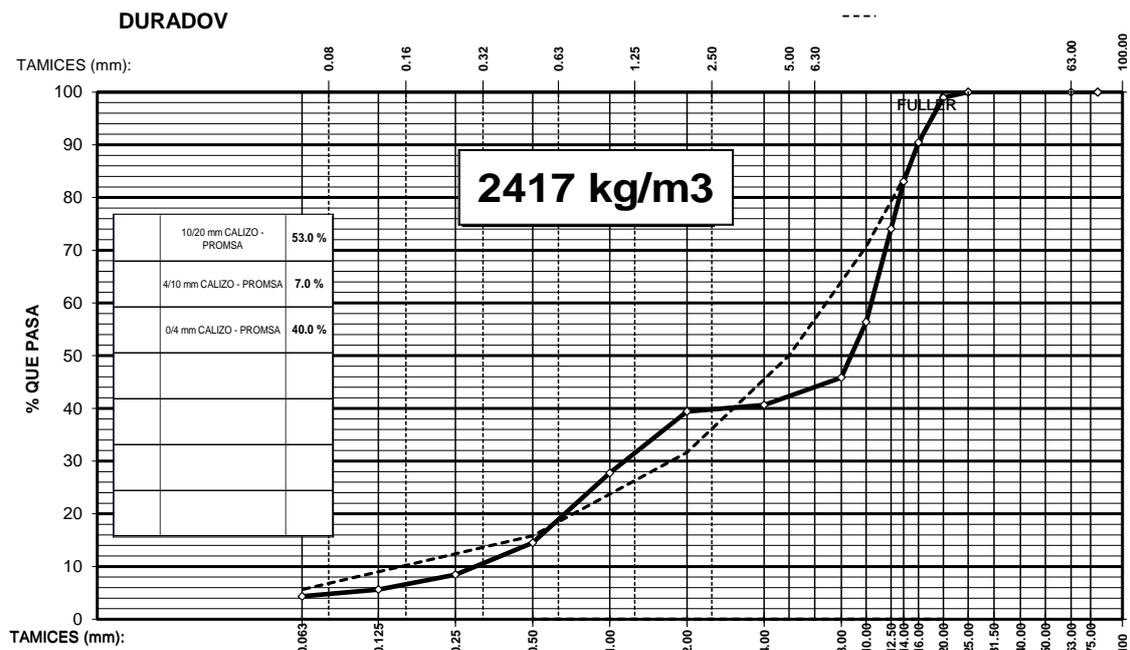
Tabla A1.3 – Curva de áridos del HC: Fase I



Se observa que no es una curva de máxima compactación, pero que las granulometrías a ambos lados de la curva de referencia están compensadas, lo que indica que se trata de una mezcla de áridos trabajable.

En el caso del hormigón de alta resistencia se ha decidido utilizar una pequeña proporción de árido 4/10 mm, siendo la curva resultante la siguiente:

Tabla A1.4 – Curva de áridos del AR: Fase I



A1.1.2 Granulometría FASE II

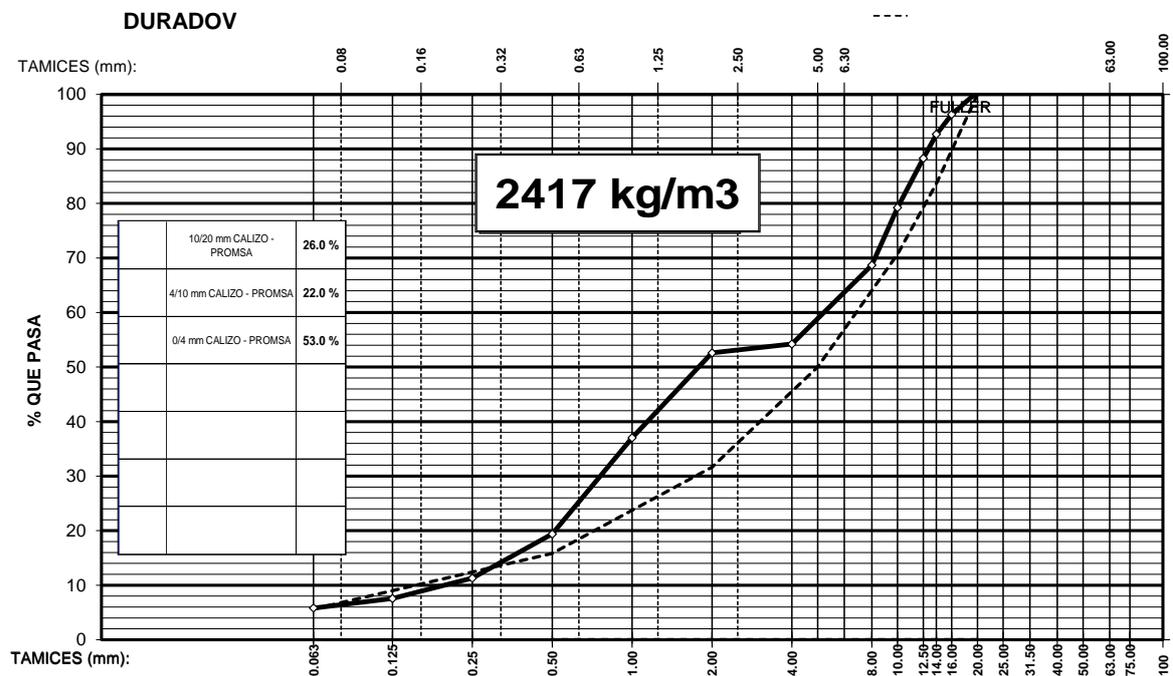
En esta segunda fase se ha decidido adecuar las dosificaciones a las que habitualmente se utilizan en la fabricación de dovelas a escala industrial. Para ello se han mantenido los contenidos de cemento, pero se modificando el esqueleto granular, de forma que se crean curvas de áridos continuas, de máxima compacidad.

Como se habían presentado problemas de amasado en la fase anterior, se ha incrementado el contenido de arena de la mezcla, para crear más “pasta” que pudiera recubrir mejor las fibras y dar más trabajabilidad al conjunto.

También se ha decidido cambiar de aditivos y pasar a utilizar un único aditivo superplastificante con mayor poder reductor de agua, el MasterGlenium UG 1323. Se elimina el plastificante ya que su principal función es dar a los hormigones un mayor plazo de trabajabilidad, que en el caso de fabricación de dovelas no es necesario puesto que no hay transporte del hormigón desde la planta a la obra. Las plantas de fabricación de dovelas tienen incorporada la planta de hormigón en sus instalaciones para reducir tiempos y aumentar la producción. El contenido de superplastificante se define para conseguir hormigones con consistencia seca-plástica, que es la necesaria para la puesta en obra de dovelas.

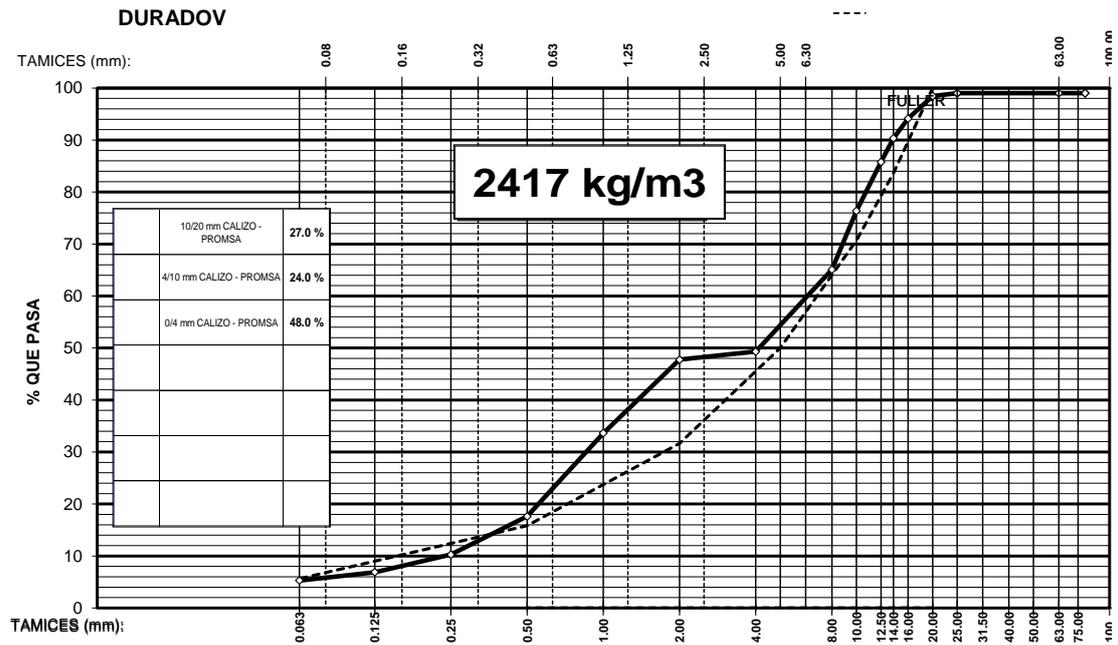
El hormigón convencional se ha diseñado con una mezcla de áridos del 53% arena, 22% 4/10 mm y 26% 10/20 mm. La curva resultante es la siguiente:

Tabla A1.5 – Curva de áridos del HC: Fase II



En el caso del hormigón de alta resistencia se ha decidido utilizar una mezcla de áridos del 48% arena, 24% 4/10 mm y 27% 10/20 mm. La curva resultante es la siguiente:

Tabla A1.6 – Curva de áridos del AR: Fase II



Finalmente, ante los resultados obtenidos en las fases previas se ha tomado la decisión de trabajar con un único tipo de hormigón para la fase III, eligiéndose el de alta resistencia por los mejores datos que presentaba en los ensayos.

APÉNDICE B – CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL HRFP A EDADES TEMPRANAS

B1.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de disponer de más información sobre la caracterización mecánica del HRFP a edades tempranas, una nueva campaña experimental se ha realizado. Se toma en consideración los ensayos de caracterización a compresión (f_{cm}) a edades tempranas (7 horas y 2 días) como a 28 días de curado, de cuatro hormigones de alta resistencia reforzados con distintos tipos de fibras no metálicas.

B1.2 MATERIALES Y DOSIFICACIONES

Durante la presente campaña experimental se han fabricado cuatro hormigones de alta resistencia reforzados con fibras no metálicas. En su composición para las dos dosificaciones, se han incorporado fibras derivadas de la poliolefina. En la tabla B1.1 se muestra la dosificación del hormigón a emplear, en la que se detallan los materiales empleados para su fabricación.

Tabla B1.1 – Dosificación del hormigón empleado

Componente	Dosificación (Kg/m ³)	
	AR	ARm
Arena 0/4	874	910
Árido 4/10	458	421
Árido 10/20	495	495
Agua	155	155
CEM I/42,5 R	420	420
MasterGlenium SKY 886	5,04	4,20
Relación a/c	0,37	

En la tabla B1.1 puede verse que ambos hormigones presentan el mismo contenido de cemento y agua, por lo que conduce a relaciones a/c de 0,37 para ambas dosificaciones. En cuanto al esqueleto granular, puede verse una diferencia en ambos tipos de hormigones, donde el hormigón correspondiente al AR (mezcla), contiene un 4,11% más arena, debido a los posibles problemas de trabajabilidad que pueda conceder la amasada de mezcla.

Las fibras no metálicas empleadas para la fabricación de los hormigones corresponden a fibras derivadas de la poliolefina empleadas en el Capítulo 3, correspondientes a la fibra PP3, PP4 y PP6.

Para cada tipo de fibra y cada dosificación de hormigón, se fabricaron diferentes amasadas. Los códigos empleados para referenciar cada amasada de hormigón, y que serán para identificarlas, se muestran en la Tabla B1.2. En ella puede verse que la nomenclatura “AR” O “ARm” corresponde a si el hormigón de alta resistencia o de alta resistencia mezclado con dos tipos de fibras, respectivamente. A estas dos letras les sigue una cifra, la cual da referencia al contenido de fibra en kg/m³. Por último, se incluye el tipo de material de las fibras utilizado mediante al código “PP”, correspondientes a las fibras de poliolefina a utilizar.

Tabla B1.2 –Códigos de las dosificaciones de hormigón

Tipo de hormigón empleado	Tipo de fibra	Contenido de fibra (kg/m ³)	Código
Hormigón Alta Resistencia	PP6	10	AR_10_PP6
	PP4	10	AR_10_PP4
Hormigón Alta Resistencia (mezcla)	PP3 + PP4	5+5	ARm_5+5_PP3,4
	PP3 + PP4	3+7	ARm_3+7_PP3,4

Para cada tipo de hormigón indicado en la Tabla B1.2, se fabricaron dos amasadas; en el caso del hormigón de alta resistencia (AR), se emplearon amasadas correspondientes a las fibras PP6 y PP4, ambas con un contenido de fibra de 10 kg/m³, en cuanto al hormigón de alta resistencia (mezcla), se emplearon amasadas correspondientes a las fibras mezcladas PP3 + PP4, con un contenido de fibras de 5 kg/m³ para cada fibra, obteniendo 10 kg/m³, y las fibras mezcladas PP3 + PP4, con un contenido de fibras de 3 y 7 kg/m³ respectivamente.

B1.3 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La caracterización de la propiedad mecánica básica del hormigón, consideró la caracterización de la resistencia a compresión tanto a edades tempranas (7 horas) como a 2 y 28 días.

B1.4 CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La Tabla B1.3 muestra el valor medio y el coeficiente de variación de los resultados de resistencia a compresión (f_{cm}) a 7 horas; 2 y 28 días para los HRFP.

Tabla B1.3 –Valores de resistencia a compresión a 7 horas, 2 y 28 días

Dosificación	Identificación	Edad [horas]	Promedio [MPa]	C.V. [%]	Edad [días]	Promedio [MPa]	C.V. [%]	Edad [días]	Promedio [MPa]	C.V. [%]
Hormigón alta resistencia	AR_10_PP6	7	43,2	6,39	2	67,1	4,64	28	67,8	2,92
	AR_10_PP4		41,9	3,04		62,3	4,31		60,1	2,94
Hormigón alta resistencia (mezcla)	ARm_5+5_PP3,4		37,3	2,09		44,4	3,19		54,4	5,33
	ARm_3+7_PP3,4		23,6	4,79		39,3	14,75		46,6	1

Con lo que respecta a las amasadas de los hormigones a *edad de 7 horas*, se consideran diferentes comportamientos en los resultados, en función del tipo de fibra. Se aprecia que las diferentes amasadas presentan tres tendencias de comportamiento, en función del valor de resistencia a compresión.

Las amasadas de mayor resistencia a compresión, representan a la dosificación de hormigón de alta resistencia AR_10_PP6 y AR_10_PP4 con un valor medio de 43,2 y 41,9 MPa respectivamente. En un comportamiento intermedio, obtenemos la amasada correspondiente a la de hormigón de alta resistencia con fibras mezcladas (ARm_5+5_PP3,4) con un valor medio de 37,3 MPa. Finalmente, la amasada con fibras mezcladas correspondiente a (ARm_3+7_PP3,4) presenta el menor valor de resistencia a compresión, encontrándose con un valor de 23,6 MPa. Estas diferencias a edades tempranas, ponen de manifiesto la pequeña influencia de las fibras en la trabajabilidad del material, por ende, el desempeño mecánico posterior.

En lo que respecta a los resultados a la *edad de 2 días*, se aprecia la misma tendencia entre los valores de resistencia a compresión a edades tempranas, en función del tipo de fibra. Las amasadas de mayor resistencia a compresión, (AR_10_PP6 y AR_10_PP4) presentan un valor medio de 67,1 y 62,3 MPa respectivamente. En el comportamiento intermedio (ARm_5+5_PP3,4) presenta un valor medio de 44,4 MPa. Finalmente, la amasada (ARm_3+7_PP3,4) presenta la menor resistencia a compresión con un valor medio de 39,3 MPa.

Para la *edad de 28 días*, se aprecian menores diferencias entre las diferentes amasadas, tanto para hormigón de alta resistencia sin fibras mezcladas, como para hormigón de alta resistencia con fibras mezcladas. Estas diferencias pueden ser reflejo de los problemas encontrados con la trabajabilidad de las mezclas, ocasionadas por las fibras. Las amasadas de mayor resistencia a compresión, (AR_10_PP6 y AR_10_PP4) presentan un

valor medio de 67,8 y 60,1 MPa respectivamente. La amasada correspondiente a AR_10_PP6 experimenta una diferencia porcentual ante AR_10_PP4 de un 12,8%, siendo la amasada PP6 la de mayor valor.

En cuanto a las amasadas correspondientes a las fibras mezcladas, la trabajabilidad de la mezcla disminuye y, por ende, disminuye la resistencia, donde la dosificación correspondiente a (ARm_5+5_PP3,4) presenta un valor medio de 54,4 MPa, y en comparación a la amasada de mayor resistencia a compresión (PP6), presenta una disminución porcentual de un 24,6%. La amasada ARm_3+7_PP3,4 presentando el valor menor de resistencia a compresión a 28 días con un alcance de 46,6 MPa, y en comparación a la amasada de mayor resistencia a compresión (PP6), presenta una disminución porcentual de un 45,5%.

Finalmente, es de destacar la diferencia entre los valores de resistencia a compresión obtenidos, para las dosificaciones de hormigón de alta resistencia y de alta resistencia con fibras mezcladas. Este resultado puede venir dado por dos factores fundamentales. Uno, puesto de manifiesto con anterioridad, la diferente trabajabilidad de las dosificaciones que condicionó de manera significativa la puesta en obra.

El segundo factor a tener en cuenta es el tipo de amasadora y moldeado de las probetas; la amasadora a utilizar no fue favorable para nuestra investigación, ya que los ganchos mezcladores de la amasadora nos propicia una acumulación grande del material, y por ende no garantizamos la homogeneidad del hormigón.

NOTACIONES Y SÍMBOLOS

σ_u	= Tensión a tracción de las fibras de la sección.....	[MPa]
σ	= Tensión.....	[MPa]
ρ_{agua}	= Densidad del agua.....	[1 g/cm ³]
ρ_{ap}	= Densidad aparente de la probeta	[g/cm ³]
ρ_{seca}	= Densidad en seco de la probeta	[g/cm ³]
ϕ	= Diámetro punzón ensayo Barcelona	[mm]
\emptyset_f	= Diámetro de las fibras.....	[mm]
φ	= Ángulo de dirección del algoritmo de Canny.....	[-]
ν	= Coeficiente de Poisson	[-]
ρ	= Resistividad eléctrica.....	[Ω -m]
AR	=Hormigón Alta Resistencia.....	[-]
B	= Basalto.....	[-]
Cf	=Contenido de fibra.....	[-]
CV	=Coeficiente de variación	[%]
HC	=Hormigón Convencional.....	[-]
E_{δ}	=Energía obtenida mediante δ	[kNmm]
E_{cm}	=Módulo Elástico.....	[GPa]
f_L	= Límite de proporcionalidad del HRF	[MPa]
$f_{R,i}$	= Resistencia residual a flexotracción del HRF	[MPa]
f_c	= Resistencia a compresión de la matriz de hormigón.....	[MPa]
f_{ck}	= Resistencia característica a compresión de la matriz de hormigón	[MPa]
f_{cm}	= Resistencia media a compresión de la matriz de hormigón.....	[MPa]
f_{ct}	= Resistencia a tracción de la matriz de hormigón.....	[MPa]
f_{ctm}	= Resistencia media a tracción de la matriz de hormigón.....	[MPa]

F_{LOP}	= Límite de proporcionalidad.....	[kN]
$F_{R,i}$	= Carga residual del hormigón reforzado con fibras.....	[kN]
FV	=Fibra de vidrio.....	[-]
G	=Gradiente de borde del algoritmo de Canny.....	[-]
$LVDT$	= Sensores de desplazamiento.....	[-]
PE	= Polietileno.....	[-]
PO	= Poliolefina.....	[-]
POm	= Poliolefina modificada.....	[-]
PP	= Polipropileno.....	[-]
$TCOD$	= Total circumferencial opening displacement.....	[mm]
R	= Resistencia eléctrica.....	[Ω]
X	= Reactancia eléctrica.....	[Ω]
w	= Ancho de fisura.....	[-]
Z	= Impedancia eléctrica.....	[Ω]