



Escola de Camins

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

**Funcionalización de fibras
metálicas aplicadas a materiales
cementicios de ultra-alta
resistencia**

Treball realitzat per:

María Elena Domínguez Sevilla

Dirigit per:

Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro

Wellington Longuini Repette

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, juny de 2016

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE MÀSTER

AGRADECIMIENTOS

La entrega de este trabajo y su posterior exposición, cierran una etapa de mi vida donde los momentos difíciles no lo han sido tanto gracias al apoyo incondicional de los de siempre. Han sido tres años duros pero también únicos. Muchas horas de estudio, un Erasmus de tan solo tres meses de estancia pero muy intenso, unas últimas asignaturas muy peleonas que me han hecho sufrir hasta el último momento... pero todo ello son experiencias que me han hecho crecer como persona y prepararme para el futuro profesional, que intuyo que será igual o más exigente.

Esta tesina es el fruto de muchos meses de trabajo donde en determinadas situaciones la desesperación consiguió salir de su escondite dificultándome el camino. Sin embargo, las personas que siempre han estado a mi lado me ayudaron a continuar. A todos ellos quiero darles las gracias.

A mis padres, por intentar ayudarme incluso cuando desconocían la razón de mi preocupación. Ellos nunca han dudado de mi capacidad y me lo han demostrado apoyándome en cada paso dado. A Carlos, por intentar relajarme en los momentos de máximo agobio. Su manera de hacerlo tenía un sello muy personal; un buen ataque apacigua las aguas. Sin embargo, su porcentaje de éxito... no era muy alto.

A mis amigas del instituto, cuatro personalidades muy diferentes pero que juntas formamos un buen equipo. Sus consejos tranquilizadores no siempre han surtido efecto en mí, pero su amistad ha amenizado estos duros años de estudio.

A los compañeros de OP, especialmente a Anna y Eva, a las chicas OMVOP y a los compañeros del Máster, por los momentos compartidos tanto de estudio como de diversión. Esta etapa no habría sido igual sin conocerlos.

A Sergio Pialarissi, uno de los tutores de la tesina, por permitirme desarrollar unas campañas experimentales como las que aquí se presentan y guiarme a lo largo de estos meses. A César, el estudiante de doctorado brasileño con el que he compartido tantas horas de laboratorio y de análisis de resultados vía whatsapp desde el otro lado del charco. Trabajar con ambos ha sido muy enriquecedor para mí. También a los técnicos de laboratorio, por solucionarme las dudas que me surgieron durante los ensayos y por arreglar las máquinas cuando fallaban.

Gracias a todos,

M^a Elena

RESUMEN

El hormigón es el material más utilizado en nuestro país para la fabricación de estructuras debido a su bajo coste en el mercado y a la facilidad para disponer de las materias primas que lo componen. Esto ha permitido que durante los últimos años se haya podido investigar la utilización de otras tipologías de hormigón no tan extendidas como el hormigón armado convencional. Entre esas otras tipologías se encuentra el HRF que permite optimizar el diseño de estructuras de hormigón ya que las fibras proporcionan al material resistencia residual tras la fisuración, mejorando así su ductilidad. Además, dependiendo de la cuantía de fibras y tipología de éstas, el elemento fabricado podría emplearse con fines estructurales.

Así pues, la adición de fibras en la matriz del hormigón convencional mejora las propiedades del material. Si esta matriz es de un HUAR, que se caracteriza por presentar resistencias mecánicas a compresión superiores a 120 MPa, se obtiene un HUARRF que resulta ser el hormigón objeto de estudio del presente trabajo. Gracias a la adición de fibras, el HUARRF también deja de presentar un comportamiento marcadamente frágil para pasar a presentar propiedades de ductilidad. Sin embargo, la interfase fibra-matriz continúa presentando poca resistencia mecánica, lo que favorece la propagación de fisuras.

El presente trabajo pretende mejorar las características de la interfase mediante la funcionalización con silano. Esta técnica consiste en aumentar la superficie específica de las fibras por deposición de sustancias, lo que incrementa la rugosidad de las fibras y mejora la adherencia entre la fibra y la matriz. Si la funcionalización se ejecuta bien y resultara ser efectiva, se podría controlar la fisuración y las propiedades mecánicas del HUARRF mejorarían a largo plazo.

El tratamiento diseñado se divide en cuatro etapas. En la primera de ellas, la fibra de acero se baña en acetona para dejar la superficie libre de grasa y residuos orgánicos adheridos durante la fabricación. La segunda etapa consiste en activar la superficie de las fibras mediante un baño en NaOH. De esta manera, se aumenta la concentración de hidroxilas en la superficie metálica para facilitar el posterior recubrimiento de silano. En la tercera etapa se realiza la funcionalización donde las fibras se introducen en una disolución de silano para ser revestidas. Por último, las fibras se sumergen en una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para que la capa de silano reaccione y propiciar así afinidad entre la fibra y la matriz.

Para evaluar la eficiencia del tratamiento, se fabrican diferentes HUARRF utilizando de refuerzo las fibras metálicas tratadas. En primer lugar, se realiza una campaña experimental preliminar donde se acotan las variables del tratamiento, como por ejemplo la concentración óptima de silano. En segundo lugar, se realiza una campaña experimental específica donde se estudia en profundidad las características de los HUARRF fabricados.

Cabe mencionar que la metodología todavía está en fase de desarrollo pero los resultados hasta ahora obtenidos sugieren que la implantación a gran escala podría ser factible.

ABSTRACT

Concrete is the most used material to build structures in our country, due to its low market price and the ease to get its primary components. That encouraged, in the last years, the research regarding the use of other typologies of concrete that are less extended than the conventional reinforced concrete. One of those new typologies is the FRC, which advantage is the optimization of the design of concrete structures. That is due to the fact that the fibres provide the material with residual resistance after cracking, leading to an improvement on its ductility. Moreover, depending on the amount of fibres and their types, the built element could be used for structural purposes.

Therefore, the addition of fibres to the matrix of the conventional concrete improves the properties of the material. If that matrix is from an UHPC, characterized by having a mechanical resistance to compression higher than 120 MPa, an UHPFRC will be obtained. HUARF is the main subject of the present study. Because of the addition of the fibres, the HUARF also changes from a mainly fragile to a ductile behaviour. However, the interphase fibre-matrix keeps having a low mechanical resistance, which favours the propagation of fissures in the material.

The current report aims to improve the features of the interphase by using the silane functionalization. This technique consists of increasing the specific surface of the fibres by substances deposition. That increases the rugosity of the fibres while improving the adherence between the fibre and the matrix. If the technique is executed properly and it results effective, the cracking would be controlled and the mechanical properties of the UHPFRC would be improved in a long term.

The designed treatment is divided in four different stages. In the first stage, the steel fibre is soaked in acetone to keep the surface free from oils and organic residues stick on it during the manufacture process. The second stage consists in activating the surface of the fibres by soaking them in NaOH. Doing that, the concentration of hydroxyl groups in the metallic surface will increase, making easier the subsequent recoating with silane. In the third stage the functionalization is carried out, introducing the fibres in a silane dissolution to cover them. Finally, the fibres are soaked in a solution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to make the layer of silane react and provide the affinity between the fibre and the matrix.

In order to evaluate the treatment, different UHPFRC are built using the treated metallic fibres as a support. Firstly, a preliminary experiment is developed to define the different variables of the treatment, such as the optimal concentration of silane. After that, a specific experiment is done in order to exhaustively study the features of the HUARF produced.

It is important to mention that the methodology is still in a development phase. However, the results that have been obtained until now suggest that the implementation of this technique at a large scale could be feasible.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Marco y problemática	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Método.....	3
1.4	Estructura del documento.....	4
2	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	5
2.1	Introducción	5
2.2	Hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras	2
2.2.1	Características del HUARRF.....	3
2.2.2	Tipo de fibras.....	4
2.2.3	Fibras de acero	5
2.2.4	Orientación y volumen de fibras	6
2.2.5	Resistencia de la matriz.....	8
2.2.6	Función de las fibras en la propagación de fisuras	9
2.2.7	Comportamiento mecánico del HUARRF	10
2.3	Interfase fibra-matriz	12
2.4	Caracterización del HUARRF.....	15
2.4.1	Ensayos de flexotracción.....	16
2.4.2	Ensayo Barcelona	17
2.4.3	Ensayo pull-out.....	18
2.4.4	Calorimetría.....	20
2.5	Funcionalización con silanos	21
2.5.1	Fenómenos de hidrólisis y condensación de los silanos	22
2.5.2	Unión del silano con la superficie de las fibras de acero	23
2.5.3	Formación y curado de la capa de silano	24
2.6	Discusión	25
3	METODOLOGÍA.....	27
3.1	Introducción	27
3.1.1	Objetivos	29
3.1.2	Organización del capítulo.....	29
3.2	Definición general del tratamiento	29
3.3	Campaña experimental preliminar	31
3.3.1	Funcionalización de las fibras.....	31
3.3.1.1	Baño desgrasante de acetona	31
3.3.1.2	Baño de hidróxido de sodio (NaOH).....	33

3.3.1.3	Funcionalización de la fibra.....	34
3.3.1.4	Baño de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂).....	37
3.3.2	Ensayos de las fibras.....	39
3.3.2.1	Microscopia óptica.....	40
3.3.2.2	Ángulo de contacto.....	40
3.3.2.3	Microscopia electrónica de barrido.....	41
3.3.3	Proceso de fabricación del hormigón.....	42
3.3.3.1	Dosificación.....	43
3.3.3.2	Materiales.....	43
3.3.3.3	Fabricación del hormigón.....	45
3.3.3.4	Descripción de las probetas.....	48
3.3.4	Ensayos del hormigón.....	48
3.3.4.1	Ensayo de flexión.....	48
3.3.4.2	Ensayo de compresión.....	48
3.3.4.3	Calorimetría.....	49
3.4	Campaña experimental específica.....	50
3.4.1	Funcionalización de las fibras.....	50
3.4.2	Proceso de fabricación del hormigón.....	52
3.4.2.1	Dosificación.....	53
3.4.2.2	Materiales.....	54
3.4.2.3	Fabricación del hormigón.....	55
3.4.2.4	Descripción de las probetas.....	57
3.4.3	Ensayos del hormigón.....	58
3.4.3.1	Ensayo de flexotracción.....	58
3.4.3.2	Ensayo de compresión.....	60
3.4.3.3	Ensayo Barcelona.....	60
3.4.3.4	Ensayo <i>pull-out</i>	61
3.4.3.5	Calorimetría.....	62
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA PRELIMINAR.....	65
4.1	Introducción.....	65
4.1.1	Objetivos.....	65
4.1.2	Organización del capítulo.....	66
4.2	Evaluación visual de la funcionalización de las fibras.....	66
4.3	Ensayos de las fibras.....	68

4.3.1	Microscopia óptica	69
4.3.2	Ángulo de contacto	70
4.3.3	Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	72
4.3.3.1	Caso 8: T_0,1%_A_N.....	72
4.3.3.2	Caso 12: T_1%_A_N.....	73
4.3.3.3	Caso 16: T_10%_A_N.....	75
4.3.3.4	Caso 18: T_10%_A_N_C	76
4.3.3.5	Análisis general de la información	77
4.4	Fabricación del hormigón.....	78
4.4.1	Trabajabilidad del HUARRFA	78
4.4.2	Calorimetría.....	79
4.5	Ensayos de caracterización del HUARRFA.....	81
4.5.1	Ensayo de compresión	81
4.5.2	Ensayo de flexión.....	83
4.6	Conclusiones.....	85
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA ESPECÍFICA	87
5.1	Introducción	87
5.1.1	Objetivos	87
5.1.2	Organización del capítulo.....	88
5.2	Fabricación del hormigón.....	88
5.2.1	Trabajabilidad del HUARRFA	88
5.2.2	Calorimetría.....	90
5.3	Caracterización del HUARRFA	91
5.3.1	Ensayo de compresión	92
5.3.2	Ensayo de flexotracción	94
5.3.2.1	Influencia de la cuantía de fibras	94
5.3.2.2	Influencia de la concentración de silano.....	96
5.3.2.3	Comparativa de las resistencias residuales.....	97
5.3.3	Ensayo Barcelona	97
5.3.4	Ensayo pull-out.....	99
5.4	Conclusiones.....	102
6	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	105
6.1	Introducción	105
6.2	Conclusiones generales	105
6.3	Conclusiones específicas	106
6.4	Perspectivas futuras.....	109

7	BIBLIOGRAFÍA	115
---	--------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. 1 Etapas del tratamiento de funcionalización de la fibra de acero.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2.1 Geometrías de fibras de acero para hormigón (Naaman A. E., 2003).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.2 Formación de erizos: a) Fibras entrelazadas antes de su incorporación a la mezcla, b) Amasado incorrecto del hormigón.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.3 Flujo de hormigón en un elemento confinado lateralmente (Blanco A., 2013).....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.4 Comportamiento al arrancamiento de fibras de acero en matrices con diferentes resistencias (Adaptado de Casagrande C.A., 2014).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5 Mecanismo de transferencia de tensiones: a) hormigón sin fibras, b) hormigón con fibras (Adaptado de Casagrande C.A., 2014).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.6 Relación carga-desplazamiento para: a) Rotura de fibras, b) Deslizamiento de fibras (Blanco A., 2008).....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.7 Comportamiento mecánico del HRF (Adaptado de Casagrande C.A., 2014).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.8 Fibra con extremos en gancho: a) Antes del arrancamiento, b) Después del arrancamiento (Abu-Lebdeh T. et al., 2011).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.9 Interfase fibra-matriz: a) Capas ZT (Markovic I., 2006), b) Imagen SEM (Garas V. Y. et al., 2012).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2. 10Microdureza alrededor de la fibra de acero para diferentes relaciones de a/c (Markovic I., 2006).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.11 Diagrama de la distribución de tensiones elástica y por fricción en hormigones reforzados con fibras (Adaptado de Casagrande C. A., 2014).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.12 Diagrama de la fuerza al arrancamiento de las fibras de acero en la matriz cementicia (Adaptado de Casagrande C.A., 2014).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.13 Fuerza al arrancar diferentes tipos de fibras: a) Diagrama de comportamiento de las fibras (Adaptado de Naaman A. E., 2012), b) Fibras trenzadas antes y después del ensayo, c) Fibras con extremos en gancho antes y después del ensayo (Kim D. J. et al., 2008).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.14 Ensayo Barcelona: a) Configuración del ensayo, b) Esfuerzos de tracción desarrollados (Carmona S., et al., 2009).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.15 Ensayo pull-out: a) Fibra única insertada en una muestra de hormigón (Naaman A. E., 2012), b) Fibra única embebida en una muestra de hormigón, c) Múltiples fibras embebidas en una muestra de hormigón (Won J.-P. et al., 2006).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.16 Evolución del calor de hidratación de un cemento Portland tipo I (Gartner E. M. et al., 2002).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.17 Fibras poliméricas después del ensayo pull-out: a) Sin tratar, b) Tratada con silano (Benzerzour M., et al., 2012).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.18 Reactividad del silano: a) Hidrólisis, b) Condensación (Casagrande C.A., 2014).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.19 Velocidad de hidrólisis/condensación de los silanos (Ooij W.J. Van et al., 2005)....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.20 Influencia de la concentración de la disolución en el espesor de la capa de silano (Zhu D., Ooij W.J. Van., 2004).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.1 Esquema del proceso de tratamiento de la fibra de acero sin tratar.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.2 Balanza con 300 gramos de fibra sin tratar.....</i>	<i>32</i>

Figura 3.3 Agitador rotatorio	32
Figura 3.4 Fibra de acero: a) Fibra sin tratar, b) Fibra desengrasada.....	32
Figura 3.5 Preparación de la disolución de NaOH: a) NaOH en perlas, b) Disolución.....	33
Figura 3.6 Fibra de acero: a) Fibra desengrasada, b) Fibra activada.....	34
Figura 3.7 Agitación magnética de las disoluciones con TEOS	36
Figura 3.8 Fibra de acero: a) Fibra activada, b) Fibra funcionalizada.....	36
Figura 3.9 Funcionalización de las fibras.....	37
Figura 3. 10 Preparación de la disolución: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en polvo.....	38
Figura 3.11 Fibra de acero: a) Fibra funcionalizada, b) Fibra funcionalizada procedente del baño en $\text{Ca}(\text{OH})_2$	38
Figura 3.12 Microscopía óptica: a) Fibra sin tratar, b) Fibra funcionalizada procedente del baño en $\text{Ca}(\text{OH})_2$	40
Figura 3.13 Ángulo de contacto: a) Imagen del ángulo, b) Cálculo del ángulo	41
Figura 3.14 Imagen SEM de la muestra de fibra funcionalizada y baño de $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Vista general y composición química	42
Figura 3.15 Granulometría de la arena.....	44
Figura 3. 16 Amasadora de 2l de capacidad	46
Figura 3.17 Ensayo de consistencia: a) Mesa de sacudidas, b) Diámetro medio.....	46
Figura 3.18 Probetas en la cámara húmeda	47
Figura 3.19 Ensayos del hormigón: a) Ensayo de flexión, b) Ensayo de compresión	49
Figura 3.20 Calorimetría: a) Cámara adiabática abierta, b) Muestra ensayada.....	49
Figura 3.21 Fabricación del hormigón: a) Preparación de los materiales, b) Incorporación de las fibras, c) Probetas.....	56
Figura 3.22 Ensayo de flexotracción: a) Esquema de configuración (cotas en mm), b) Probeta en el equipo.....	59
Figura 3.23 Fisuración en la probeta prismática: a) Vista general, b) Detalle.....	60
Figura 3.24 Ensayo Barcelona: a) Ejecución del ensayo, b) Probeta ensayada donde se aprecian las fisuras.....	61
Figura 3.26 Ensayo de pull-out: a) Preparación del ensayo, b) Detalle de la abertura de fisura de una probeta ensayada	62
Figura 4.1 Muestras de fibra procedentes de las diferentes etapas del tratamiento.....	67
Figura 4.2 Ángulo de contacto: a) de las fibras de referencia, b) de las fibras tratadas	71
Figura 4.3 Imagen SEM del Caso 8 T_0,1%_A_N: a) Vista general de la fibra, b) Detalle, c) Espectro del SEM de la superficie.....	73
Figura 4.4 Imagen SEM del Caso 12 T_1%_A_N: a) Vista general de la fibra, b) Espectro del SEM de la zona de transición.....	74
Figura 4. 5 Imagen SEM del Caso 12 T_1%_A_N: a) Detalle de la zona más densa del revestimiento, c) Espectro del SEM de la acumulación.....	74

<i>Figura 4.6 Imagen SEM del Caso 12 T_1%_A_N: a) Detalle de la zona menos densa del revestimiento, c) Espectro del SEM de la superficie</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.7 Imagen SEM del Caso 16 T_10%_A_N: a) Vista general de la fibra, b) Detalle, c) Espectro del SEM de la superficie</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.8 Imagen SEM del Caso 18 T_10%_A_N_C: a) Detalle de la fibra, b) Espectro del SEM de la zona con mayor espesor de recubrimiento, c) Espectro del SEM de la zona con menor espesor de recubrimiento.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.9 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental preliminar</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.10 Calorimetría del HUARRFA en la campaña experimental preliminar.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.11 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.12 Resistencia a flexión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.1 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental específica</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.2 Calorimetría del HUARRFA en la campaña experimental específica</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.3 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental específica.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.4 Comparativa de la resistencia a compresión del HUARRFA a 3, 7 y 28 días en la campaña experimental específica.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5. 5 Tensión por flexión y energía acumulada de los hormigones reforzados con fibras de referencia a 28 días en la campaña experimental específica</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5. 6 Tensión por flexión y energía acumulada de los hormigones reforzados con fibras tratadas a 28 días en la campaña experimental específica</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.7 Tensión a tracción y energía acumulada del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental específica.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.8 Curvas tensión-energía-ancho de fisura a la edad de: a) y b) 3 días, c) y d) 7 días, e) y f) 28 días, g) y h) 90 días</i>	<i>100</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Obras construidas de HUARRF</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 2.2 Características de las fibras (Blanco A., 2008)</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2.3 Ensayo de flexotracción en normativas europeas</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de las fibras metálicas</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3.2 Características del silano tipo TEOS</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3.3 Nomenclatura de las fibras en la campaña experimental preliminar</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3.4 Dosificación del HUARRF en la campaña experimental preliminar</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3.5 Especificaciones técnicas del cemento</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3.6 Especificaciones técnicas del superplastificante</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3.7 Especificaciones técnicas de la mezcla de nanosílice</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3.8 Nomenclatura y fecha de ensayo del hormigón fabricado en la campaña experimental preliminar</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 3.9 Nomenclatura de las fibras en la campaña experimental específica</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 3.10 Dosificaciones del HUARRF en la campaña experimental específica</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3.11 Especificaciones técnicas del filler calizo</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 3.12 Nomenclatura y fecha de ensayo del hormigón fabricado en la campaña experimental específica</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 4.1 Recuento manual de fibras: n° fibras/gramo</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.2 Análisis fotográfico: a) REF_A, b) REF_A_C, c) T_0,1%_A_N_C, d) T_1%_A_N_C, e) T_10%_A, f) T_10%_A_C</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.3 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental preliminar</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.4 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 4.5 Resistencia a flexión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5.1 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental específica</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 5.2 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental específica</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 5.3 Resistencia a compresión del HUARRFA a 3 y 7 días en la campaña experimental específica</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 5.4 Flexotracción: Tensiones asociadas a los anchos de fisura de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm de los hormigones de referencia</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 5.5 Flexotracción: Tensiones asociadas a los anchos de fisura de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm de los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 5.6 Ensayo Barcelona: Tensiones asociadas a los anchos de fisura de 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 4 mm y 6 mm</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 5.7 Pull-out: Tensiones asociadas a las separaciones por arrancamiento de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm, 4,5 mm y 5,5 mm a la edad de 28 días</i>	<i>102</i>

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Marco y problemática

El desarrollo de la industria de la construcción propone continuamente nuevas técnicas de cálculo y diseño así como importantes avances en los materiales utilizados. Una prueba de estos avances es el hormigón reforzado con fibras (HRF) que es una alternativa al hormigón armado convencional. La adición de fibras en cantidades adecuadas permite la mejora de las características del material, mejorando su comportamiento a flexotracción y aumentando su resistencia a tracción y su durabilidad. Estas mejoras han propiciado un creciente uso del HRF durante las últimas décadas.

Por otro lado, el hormigón de alta resistencia (HAR), que presenta una resistencia característica de proyecto superior a 50 MPa a 28 días, es un material cuya vida útil se estima tres veces superior a la del hormigón convencional. Esto se debe a que tiene un mayor contenido en cemento y una menor relación a/c, lo que favorece la durabilidad. Este tipo de hormigón permite construir estructuras más esbeltas, sus estructuras fabricadas convergen hacia criterios de sostenibilidad, los tiempos de ejecución se acortan y necesita un menor mantenimiento. Asimismo, cuando se necesitan resistencias superiores, aparece en escena el

hormigón de ultra-alta resistencia (HUAR) que presenta resistencias mecánicas a compresión con valores superiores a 120 MPa, manteniendo las características de su predecesor.

La matriz de los HUAR se caracteriza por ser densa y resistente y tener un mayor contenido de aditivos superplastificantes, microsílíce y agregados de alta resistencia. Sin embargo, estos hormigones continúan presentando un comportamiento marcadamente frágil. Así pues, para mejorar dicho comportamiento, una solución sería la adición de fibras que aumentaría la ductilidad del material, dando lugar al hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras (HUARRF).

Después de realizar un recorrido por la familia del HUARRF, éste se podría definir como aquel hormigón que presenta una resistencia característica de proyecto superior a 120 MPa y que incluye en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. No obstante, aunque el uso del HUARRF parece estar limitado debido a la ausencia de una normativa específica para este tipo de hormigón, su problema se encuentra en las características de la interfase fibra-matriz.

Usando como adición fibras de acero, cuando éstas se añaden en el hormigón, se forma una película de agua alrededor de ellas y se concentran menos partículas cementicias en esta zona que en el resto del hormigón. Además, con la hidratación del cemento, en la zona de transición (ZT) precipitan cristales de portlandita, agujas de etringita y C-S-H en menor concentración, provocando que esta zona sea porosa. Esta porosidad confiere a la ZT poca resistencia mecánica, favoreciendo así la propagación de fisuras. De ahí que se diga que la zona débil del HUARRF es la interfase fibra-matriz.

La fisuración del material a tracción depende directamente de la adherencia entre la fibra y la matriz. De hecho, para aumentar la respuesta mecánica del hormigón se debe aumentar previamente dicha adherencia. Una manera de incrementarla sería mediante la modificación de la superficie de las fibras. Esta modificación tiene como objetivo aumentar la superficie específica de las fibras por deposición de sustancias, incrementando la rugosidad de las fibras y mejorando la adherencia física de la fibra con la matriz. Una técnica para llevar a cabo esta mejora de la calidad de la superficie de la fibra es la funcionalización con silano. Así, si la funcionalización se realiza con éxito, los HUARRF presentan mejores propiedades mecánicas a largo plazo.

1.2 Objetivos

En base a las razones expuestas en el apartado anterior, se define como objetivo principal de esta Tesis de Máster la mejora de la interfase fibra-matriz mediante la funcionalización con silano de tipo TEOS. Conseguir con éxito este objetivo, mejoraría el comportamiento mecánico del HUARRF aumentando su resistencia residual.

Con el fin de alcanzar el objetivo general, se plantea una serie de objetivos específicos para comprender en mayor profundidad el tratamiento de la funcionalización de las fibras y el comportamiento del HUARRF. Estos objetivos específicos son los siguientes:

- Realizar un estudio de la literatura existente que permita conocer los factores que influyen en las propiedades del HUARRF así como en la funcionalización con silanos.
- Planificar una campaña experimental preliminar capaz de acotar las variables del tratamiento de funcionalización.
- Evaluar la influencia de cada una de las etapas del tratamiento y determinar la concentración óptima de silano.
- Planificar una campaña experimental específica capaz de proporcionar los resultados necesarios para entender el comportamiento del material.
- Evaluar la influencia de la cuantía de fibras.
- Analizar la respuesta del material frente al ensayo de flexotracción, compresión, Barcelona y *pull-out* según las diferencias asociadas a los diferentes tipos de fibra tratada incorporados a la mezcla.

1.3 Método

Para modificar la superficie de la fibra con el objetivo de mejorar la interfase fibra-matriz, se va a llevar a cabo un tratamiento formado por una etapa de desengrase, un baño en hidróxido de sodio, una etapa de funcionalización y un baño en hidróxido de calcio, tal y como se esquematiza en la Figura 1.1. Cabe señalar que se trata de una metodología de tratamiento de fibra de acero que aún está en fase de desarrollo.

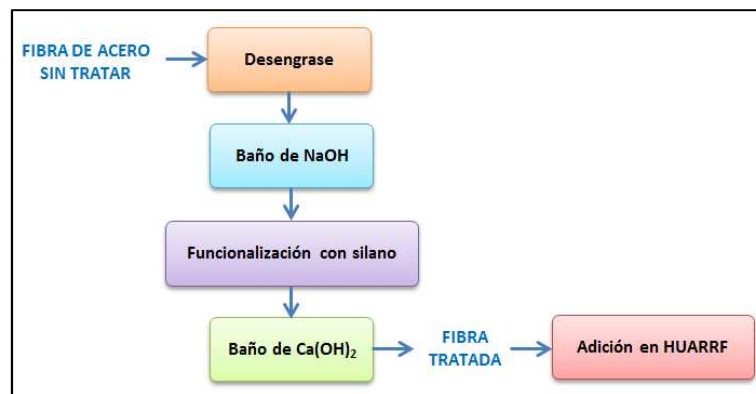


Figura 1. 1 Etapas del tratamiento de funcionalización de la fibra de acero

La etapa de desengrase, realizada con acetona, elimina los residuos orgánicos adheridos a la fibra durante su etapa de fabricación dejando la superficie de la fibra libre de grasa y residuos. Una vez la fibra está desengrasada, se baña en una disolución de NaOH para activar su superficie. Dicha activación consiste en aumentar la concentración de hidroxilas en la superficie metálica para propiciar la posterior unión del silano con la fibra.

A continuación, se realiza la funcionalización de la fibra donde la superficie de ésta queda revestida de silano. Por último, se realiza un baño en Ca(OH)_2 para que el silano reaccione y así aumentar la compatibilidad de la fibra con la matriz, lo que mejoraría las características de la interfase.

1.4 Estructura del documento

El presente documento recoge el trabajo realizado en esta Tesis de Máster. Dicho documento se ha organizado de modo que pueda dar respuesta a los objetivos planteados anteriormente. La metodología seguida pretende abordar los principales temas que den respuesta a dichos objetivos. Por ello, el documento se ha estructurado en forma de capítulos que abordan los temas estudiados. A continuación, se muestran los capítulos que lo forman y una breve descripción del tema que trata cada uno de ellos.

- En el **Capítulo 1**, se describen las necesidades de desarrollar este trabajo. Asimismo, se identifican los objetivos generales y específicos que pretenden alcanzarse tras la propuesta de dichas necesidades.
- En el **Capítulo 2**, se realiza una breve revisión del estado del conocimiento en relación al HUARRF y a la funcionalización con silanos. Respecto al HUARRF, en este apartado se presentan las propiedades estudiadas por diversos autores, las características de la interfase fibra-matriz y los ensayos más empleados para su caracterización. Además, se incorpora una breve descripción de los factores que influyen en el comportamiento mecánico, tales como tipo de fibra y orientación de ésta en el interior del hormigón, entre otros. Respecto a la funcionalización, se describe con bastante detalle en qué consiste dicho tratamiento y los factores que influyen en él.
- En el **Capítulo 3**, se describe la planificación y las campañas experimentales llevadas a cabo en el laboratorio. En primer lugar, se describen los procesos seguidos en cada etapa del tratamiento de la fibra, el material utilizado y los ensayos realizados. En segundo lugar, se muestran las dosificaciones y materiales empleados para la fabricación de los hormigones, además de la descripción de las probetas utilizadas para la ejecución de los ensayos. La descripción de los ensayos explica el procedimiento seguido para su realización y los equipos empleados para ello. Una vez finalizada la descripción de la campaña preliminar, se describe la campaña específica siguiendo el mismo orden.
- En el **Capítulo 4 y Capítulo 5**, se muestran los resultados obtenidos tras la realización de la campaña preliminar y la campaña específica, respectivamente. El **Capítulo 4** incide en el análisis de los resultados obtenidos de la funcionalización de la fibra, mientras que **Capítulo 5** incide en el análisis de los resultados de cada ensayo de caracterización del hormigón en función del tipo de fibra tratada que ha sido incorporada a la mezcla.
- Por último, en el **Capítulo 6**, se muestran las conclusiones obtenidos de la realización de este documento. En él se trata de dar respuesta a los objetivos planteados al inicio del presente capítulo y se plantean futuras líneas de investigación que darán continuidad al estudio de este documento.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 Introducción

Los hormigones de ultra-alta resistencia reforzados con fibras de acero (HUARRFA) presentan elevada ductilidad y las fibras controlan la fisuración del material a tracción. Esta fisuración depende directamente de la adherencia entre la fibra y la matriz y por tanto, para aumentar la respuesta mecánica del material se debe incrementar dicha adherencia. Para ello, se pretende mejorar las características de la interfase fibra-matriz, que se trata de la zona débil de este material, mediante la modificación de la superficie de las fibras. Respondiendo a esta necesidad, en este capítulo se efectúa un estado general del conocimiento del HUARRFA y de su interfase fibra-matriz, que está estructurado en cuatro partes.

En la primera parte de este capítulo se recaba información sobre las propiedades de los HUARRF y de los tipos de fibras que se pueden utilizar como refuerzo, prestando más atención a las fibras metálicas. Es importante conocer las características que presentan las fibras de acero y cómo éstas afectan al comportamiento mecánico del HUARRF.

En la segunda parte se pretende conocer la composición y las propiedades de la zona de transición (ZT) entre la fibra de acero y la matriz del hormigón para identificar sus puntos débiles. Así, se podrían buscar maneras de mejorar sus características lo que implicaría una

mejora en las propiedades del hormigón. Por otro lado, en la tercera parte del capítulo se describen los métodos más habituales para la caracterización mecánica de este material, eligiendo aquellos ensayos que son más apropiados para estudiar el comportamiento de la interfase.

Por último, se recaba información sobre cómo mejorar las características de la ZT, centrando esta parte del capítulo en técnicas que modifiquen la superficie de las fibras de acero con el objetivo de conseguir una mejora en la adherencia de la fibra con la matriz. Por ello, se describe con detalle la técnica de funcionalización con silano para estudiar si su aplicación reduciría la porosidad y la presencia de etringita y portlandita que tanto caracteriza a la ZT.

2.2 Hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras

A grandes rasgos, los hormigones de ultra-alta resistencia (HUAR) aparecen con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica a compresión de los hormigones de alta resistencia (HAR). Así pues, ese aumento de las propiedades mecánicas coloca al HAR en una categoría superior, clasificándolo como HUAR. Sin embargo, esta clasificación no presenta una interpretación única ya que dependiendo de la referencia consultada, el valor límite de resistencia a compresión para clasificar el hormigón en HAR o HUAR varía. De hecho, algunas referencias consultadas clasifican los hormigones con resistencia mecánica a compresión superior a 80MPa como HAR y los hormigones con resistencia superior a 120 MPa como HUAR (Buitelaar P., 2004). En cambio, otras referencias clasifican los hormigones como HUAR cuando presentan resistencias a compresión del orden de los 200 MPa (Tang M.-C., 2004).

La Instrucción EHE-08 define al HAR como aquel hormigón que presenta una resistencia característica de proyecto f_{ck} superior a 50 N/mm² a 28 días, obtenida mediante ensayos sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Este material presenta propiedades superiores a las del hormigón armado convencional. Otra de las grandes diferencias entre el hormigón convencional y los hormigones de alta resistencia es la trabajabilidad ya que en los hormigones convencionales es controlada por el agua y en los HAR y HUAR por los aditivos superplastificantes (Freitas D. A., 2011).

Por otro lado, la matriz de los HUAR se caracteriza por ser densa y resistente y tener un mayor contenido de aditivos superplastificantes, microsílíce y agregados de alta resistencia. No obstante, estos hormigones siguen presentando un comportamiento marcadamente frágil siendo clave la adición de fibras para aumentar su ductilidad. De este modo, la adición de fibras en la matriz densa del HUAR da como resultado el hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras (HUARRF). Cabe mencionar que el concepto en que se basa el HUARRF es en cierto modo semejante al del hormigón armado convencional, ya que se trata de coser las fisuras que puedan producirse y que dejarían a la estructura fuera de servicio.



Así pues, después de haber comparado diferentes referencias consultadas, se puede definir al HUARRF como aquel hormigón que presenta una resistencia característica de proyecto f_{ck} superior a 120 MPa y que incluye en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Cabe recalcar que el HUARRF no se trata de un nuevo material, sino del resultado de mejorar las características del HUAR.

2.2.1 Características del HUARRF

El HUARRF se caracteriza por ser ultracompacto y homogéneo y por presentar una elevada resistencia mecánica, así como un módulo de elasticidad alto y gran libertad para definir la geometría y el espesor de las piezas fabricadas. La incorporación de fibras mejora la resistencia a flexotracción, la capacidad de transferencia de cargas y el control de la fisuración y además, aumenta la resistencia a tracción y la tenacidad. Asimismo, debido a que la introducción de fibras permite la sustitución parcial o total de armaduras, se favorece la reducción en los tiempos constructivos (Serna P. *et al.*, 2012). Por otra parte, se trata de un hormigón que presenta una consistencia fluida en estado fresco ya que en su composición no hay árido grueso. Una vez curado, presenta baja permeabilidad a la humedad y a los agentes agresivos presentando mejor durabilidad debido a la baja relación agua/cemento, que es del orden de 0,15 a 0,20 (Richard P., Cheyrezy M., 1995).

No obstante, presenta un coste unitario inicial más elevado que el coste del hormigón armado convencional. Por ello, sus aplicaciones se centran en optimizar su uso reduciendo el espesor del elemento de hormigón, cambiando las formas estructurales o desarrollando soluciones que aborden las deficiencias estructurales del hormigón convencional (Russell H. G., Graybeal B. A., 2013). La Tabla 2.1 muestra estructuras que han utilizado HUARRF para fabricar la totalidad o alguno de sus elementos. Se utiliza este hormigón con el objetivo de disminuir las dimensiones de los elementos.

Tabla 2.1 Obras construidas de HUARRF

LOCALIZACIÓN DE LA OBRA	FOTOGRAFÍA DE LA OBRA
Pasarela de peatones en Sherbrooke (Canadá)	
Cubierta de la estación de peaje de Millau (Francia)	
Paneles de la fachada del estadio Jean Bouin en París (Francia)	

Respecto al comportamiento mecánico del HUARRF, cuando éste es sometido a una carga, se produce una respuesta lineal hasta alcanzar su tensión de rotura. Una vez alcanzada dicha tensión, el HUARRF sigue resistiendo la carga gracias a la ductilidad aportada por las fibras, observándose un comportamiento no lineal del hormigón ya que las fibras comienzan a trabajar tras la aparición de la primera fisura. Así pues, lo interesante de la contribución de las fibras no es el incremento de la resistencia pico, sino el aumento de la resistencia residual

(Barros J. A. O. *et al.*, 2005). Es importante mencionar que la incorporación de fibras supone un aporte de resistencia que depende del tipo de fibras, de su geometría, del volumen incorporado, de su orientación y de la resistencia de la matriz. A continuación, se describen estos factores.

2.2.2 Tipo de fibras

Como se ha comentado anteriormente, la adición de fibras modifica el comportamiento no lineal del HUARRE, aportándole propiedades de ductilidad que dependen del tipo de fibra utilizada. Según la EHE-08, las fibras utilizadas en el HRF se pueden clasificar según su naturaleza en fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas, siendo las fibras de acero las más utilizadas.

En primer lugar, las fibras de acero, tanto las de acero al carbono como las de acero inoxidable, mejoran la tenacidad y por tanto, la resistencia al impacto, levemente la resistencia mecánica a compresión y más notoriamente la resistencia a tracción. Asimismo, se pueden encontrar fibras revestidas de zinc o galvanizadas que resultan menos costosas que las fibras de acero inoxidable y presentan resistencia a la corrosión. En segundo lugar, las fibras poliméricas, que están fabricadas de polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, nylon, poliéster, etc., disminuyen la retracción. Por último, las fibras inorgánicas, que están fabricadas de vidrio, pueden presentar una capa de epoxi superficial para evitar su reacción con los álcalis del cemento.

Según la bibliografía consultada, las fibras deben presentar ciertas propiedades para que trabajen de forma efectiva junto con la matriz del hormigón (Naaman A. E., 2003). Entre dichas propiedades se considera que la resistencia a tracción debe ser de entre dos a tres órdenes de magnitud mayor que la del hormigón, la adherencia con la matriz del hormigón debe ser del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz, el módulo elástico debe ser superior al de la matriz y el coeficiente de *Poisson* y el de dilatación deben ser semejantes o superiores a los de la matriz del hormigón.

En la Tabla 2.2 se muestran algunas características de las fibras utilizadas en morteros y hormigones. Analizando dicha tabla, se observan diferencias significativas en la resistencia a tracción y en el módulo de elasticidad entre las fibras y el hormigón. Además, se observa que se cumplen las propiedades anteriormente mencionadas referentes a que la resistencia a tracción y el módulo elástico de las fibras deben ser mayores que los del hormigón.

Tabla 2.2 Características de las fibras (Blanco A., 2008)

TIPO DE FIBRA	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)	DENSIDAD (kg/m ³)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
Acero	500-3000	210	7800	3,5
Acero inoxidable	2100	160	7860	3,0
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
Poliéster	700-900	8,2	1400	11,0-13,0
Hormigón	5-8	30	2300	-

Las fibras de acero son las más utilizadas ya que permiten fabricar morteros y hormigones con mejor resistencia a flexión, tracción, etc. Son fibras efectivas ya que presentan una buena adherencia con el hormigón y además, tienen un módulo de elasticidad siete veces mayor que el del hormigón, tal y como se observa en la Tabla 2.2. Así pues, son eficaces y también económicas. Por ello, en las campañas experimentales del presente trabajo se utilizará este tipo de fibras. A continuación, se describen las características principales de las fibras de acero.

2.2.3 Fibras de acero

Las fibras metálicas suponen una alternativa al armado del hormigón convencional. Estas fibras son discontinuas, con distribución discreta y uniforme confiriendo al material isotropía y homogeneidad. La geometría de las fibras es variada, pudiendo presentar sección circular, cuadrada o rectangular. Además, para mejorar la adherencia con el hormigón, las fibras pueden tener los extremos conformados, ondulados, corrugados, aplastados, en ganchos, etc. Respecto a las dimensiones de las fibras, éstas oscilan entre 0,25 y 0,80 mm de diámetro y entre 10 y 75 mm de longitud (Blanco A., 2008). La Figura 2.1 muestra diferentes geometrías de fibras de acero para morteros y hormigones.

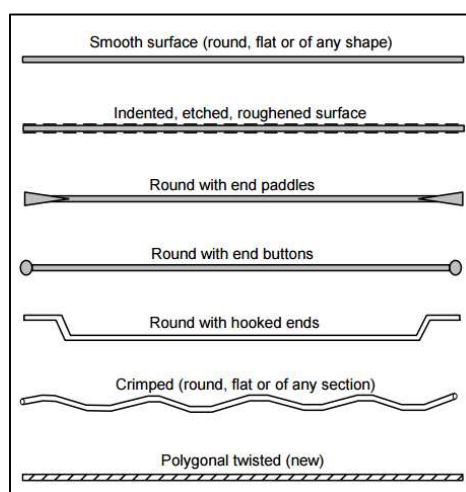


Figura 2.1 Geometrías de fibras de acero para hormigón (Naaman A. E., 2003)

El método de obtención de estas fibras no es único, aunque el más habitual es el procedimiento de corte de alambres trefilados de acero de bajo contenido de carbono. Otros métodos son el corte de láminas de acero y el arrancamiento en caliente, consiguiendo fibras de sección cuadrada y fibras con forma de viruta, respectivamente.

En la caracterización de las fibras de acero se utilizan tres parámetros básicos: la esbeltez, la resistencia a tracción del acero y la forma. En primer lugar, la esbeltez (λ) se define como la relación entre la longitud de la fibra y su diámetro (l_f/d_f). La esbeltez mantiene una relación directa con la mejora de las propiedades del hormigón, siendo los valores habituales entre 30 y 150 aunque no es aconsejable pasar de un valor de 100, debido a los problemas que conlleva en la compactación (Puig C., 2011). Cabe mencionar que a mayor esbeltez, la dosificación de fibras a utilizar será menor. En segundo lugar, la resistencia a tracción de las fibras depende de la calidad del acero. De hecho, con un contenido medio de carbono, se pueden alcanzar resistencias de 2000 MPa, siendo estas fibras adecuadas para hormigones de alta resistencia.

Respecto a la forma, que como ya se ha comentado es un parámetro clave para posibilitar la adherencia con el hormigón, se obtienen mejores resultados con fibras trefiladas de sección circular y con extremos conformados.

Cabe mencionar que otro de los aspectos interesantes de las fibras de acero es que, a diferencia de las armaduras convencionales, prácticamente no presentan riesgos de corrosión. Además, este posible problema desaparece con la incorporación de fibras plásticas ya que están fabricadas con materiales poliméricos, compuestos que no se ven afectados por este tipo de ataque (Galeote E., 2014). No obstante, en las campañas experimentales del presente trabajo, las fibras plásticas no serán objeto de estudio.

Como ya se ha comentado, el comportamiento que presentan las fibras de acero al estar embebidas en el hormigón es diferente dependiendo de su geometría (ver Figura 2.1). Sin embargo, también depende de la longitud de anclaje, de la orientación, del volumen de fibras adicionado y de la resistencia de la matriz. De hecho, una buena orientación de las fibras puede ayudar al buen comportamiento resistivo del material mientras que una mala orientación, puede tener una contribución nula en el control de fisuras. A continuación, se define la importancia de los parámetros orientación y volumen de fibras.

2.2.4 Orientación y volumen de fibras

La dispersión de las fibras en el interior del material es uno de los problemas más importantes en el diseño y en la obtención de aplicaciones seguras del HRF (Ferrara L. *et al.*, 2012). Esta dispersión, que se entiende como la orientación y la posición de las fibras en el interior de la matriz del hormigón, es uno de los factores que influyen en la resistencia postfisuración. Por ello, el número de fibras efectivas en la superficie de fractura tiene una gran influencia en la resistencia residual (Abrishambaf A. *et al.*, 2012). La orientación de las fibras es consecuencia de diversos factores, independientes entre ellos, que se producen en el estado fresco del hormigón. Algunos de estos factores son el proceso de amasado del hormigón, el método de hormigonado, la geometría de los moldes y los efectos de vibrado (Blanco A., 2013).

Respecto al proceso de amasado del hormigón, si las fibras se incorporan en el último momento en vez de añadirlas junto con los áridos, el hormigón debe ser suficientemente fluido para conseguir una distribución homogénea de las fibras en todo el volumen de hormigón. De esta manera se intenta evitar la formación de erizos, que son conjuntos de fibras fuertemente entrecruzadas, tal y como se observa en la Figura 2.2. Cabe señalar que las fibras se han de separar antes de incorporarlas a la mezcla ya que al estar en contacto también se entrelazan formando erizos.

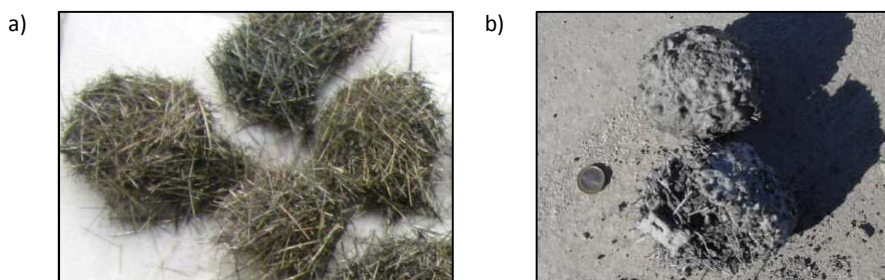


Figura 2.2 Formación de erizos: a) Fibras entrelazadas antes de su incorporación a la mezcla, b) Amasado incorrecto del hormigón

Cabe mencionar que el riesgo de formación de erizos se puede reducir empleando una dosificación rica en árido fino, con un contenido de fibras no muy elevado y que éstas no sean muy esbeltas. Es importante limitar el contenido de fibras ya que durante la mezcla aumenta la posibilidad de interacción entre ellas, propiciando la formación de erizos y afectando la trabajabilidad de la mezcla (Barnett S. J. *et al.*, 2010). Además, la formación de erizos puede afectar a la capacidad de carga del elemento y desencadenar mecanismos de rotura que no fueron previstos durante la fase de diseño de dicho elemento.

Otro factor a tener en cuenta en la orientación de las fibras es el método de hormigonado. De hecho, algunos estudios demuestran que las fibras se orientan según el flujo del hormigón durante su vertido (Stähli P. *et al.*, 2008; Barnett S. J., *et al.*, 2010; Abrishambaf A. *et al.*, 2013). Mientras otros estudios se centran en analizar cómo afectan los moldes de las probetas en la orientación de las fibras (Martinie L., Roussel N., 2011). En estos segundos estudios, el flujo del hormigón se divide en un flujo libre y un flujo confinado donde la velocidad de este último flujo es menor al estar en contacto con la pared del molde, que se produce por el conocido efecto pared. En cambio, en el flujo libre se asume una velocidad constante de todo el flujo. Esta diferencia en las velocidades genera diferencias de tensiones, influyendo en la orientación de las fibras en función del flujo al que se encuentren sometidas, como se muestra en la Figura 2.3. Cabe mencionar que las fuerzas de arrastre del hormigón hacen girar a las fibras alineándolas en la dirección del flujo.

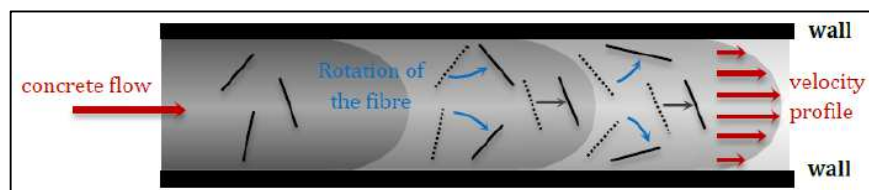


Figura 2.3 Flujo de hormigón en un elemento confinado lateralmente (Blanco A., 2013)

El último de los factores que afectan a la orientación de las fibras es la vibración, produciendo que las fibras se orienten preferentemente en un plano horizontal. La orientación provocada por la vibración depende del tiempo de vibrado y de la trabajabilidad del hormigón, teniendo muy presente que un exceso de vibración puede producir la segregación del hormigón (Dupont D., Vandewalle L., 2005).

Por otro lado, el volumen de fibras incorporado a la mezcla también tiene una relación directa sobre la capacidad de resistencia residual. De hecho, según la bibliografía consultada, cuanto mayor es el volumen de fibras, menor es el espacio entre ellas y mayor es el número de fibras por unidad de área (Aveston J., Kelly A., 1973). Por tanto, mayor es la cantidad de fibras por unidad de volumen del material y mayor la probabilidad de que una fibra intercepte una fisura de manera efectiva.

Para determinar el volumen de fibras, en primer lugar se necesita calcular el volumen crítico de fibras ($V_{f_{crit}}$), definido como aquel volumen de fibras, que después de la fisuración de la matriz, permitirá soportar la carga hasta la rotura. Dicho volumen se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Aveston J. *et al.*, 1971):

$$V_{fcrit} = \frac{\varepsilon_{mu} \cdot E_c}{\sigma_{fu} \cdot \eta_1} \quad (1)$$

Donde:

V_{fcrit} es el volumen crítico de fibras,

ε_{mu} es la deformación última de rotura de la matriz,

E_c es el módulo de elasticidad del material,

σ_{fu} es la resistencia a tracción de la fibra,

η_1 es un factor de corrección en función de la orientación de las fibras de *Krenchel*.

Analizando la ecuación (1), se observa que si la matriz del material es muy resistente, el volumen crítico será elevado ya que en el momento de la fisuración se necesitará una cantidad mayor de fibras que intercepten la fisura. En cambio, si la resistencia de las fibras es elevada, el volumen crítico será menor lo que exigirá una cantidad menor de fibras en la región de la fisura. Ello se debe a que al incorporar fibras con alta resistencia a tracción, éstas ya presentan mayor capacidad de resistir las cargas solicitadas postfisuración y no son necesarias más fibras por unidad de volumen del material.

Para finalizar con la descripción de los parámetros que afectan al comportamiento que presentan las fibras de acero al estar embebidas en el hormigón, llega el turno al último de ellos. Por tanto, después de explicar cómo afecta el tipo de fibra, la geometría, la orientación y el volumen de fibras incorporadas, a continuación se explica la influencia de la resistencia mecánica de la matriz.

2.2.5 Resistencia de la matriz

La resistencia de la matriz es una propiedad directamente relacionada con el volumen crítico de fibras. Por otro lado, la transferencia de tensiones depende de la calidad de la interfase fibra-matriz y ésta a su vez, depende de las características de la matriz. Por tanto, una matriz más resistente propicia que la interfase fibra-matriz sea más densa y menos susceptible al colapso y que la resistencia residual sea superior (Wille K. *et al.*, 2012). La Figura 2.4 muestra la fuerza de arrancamiento que presenta la fibra de acero de tipo trenzada dependiendo de la resistencia a compresión de la matriz donde ha sido incorporada. Analizando esta Figura, se confirma que cuanto mayor es la resistencia de la matriz, más energía se necesita para arrancar la fibra.

Asimismo, la composición del hormigón tiene relación directa con la resistencia mecánica. De hecho, los hormigones con mayor cantidad de árido grueso resultan menos resistentes que los hormigones con mayor cantidad de partículas finas, como es el caso del HUARRF. Ello se debe a que para una misma relación a/c y un mismo volumen, las partículas finas presentan mayor superficie específica y la capa de agua alrededor de dichas partículas es menos espesa, reduciendo la zona de transición. Esto implica que dicha zona sea menos débil y por tanto, el hormigón presenta mayor resistencia.

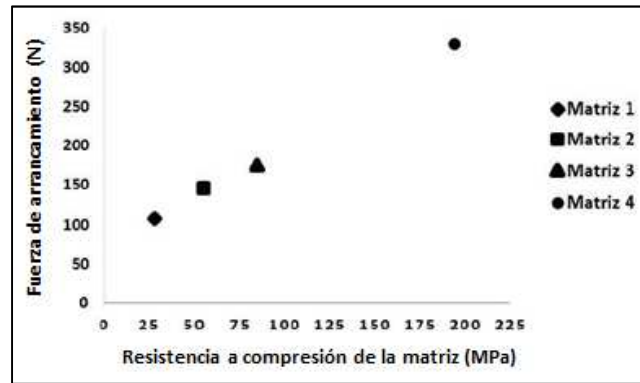


Figura 2.4 Comportamiento al arrancamiento de fibras de acero en matrices con diferentes resistencias (Adaptado de Casagrande C.A., 2014)

Una vez explicados todos los factores que afectan al comportamiento del hormigón reforzado con fibras, a continuación se explica el papel que desempeñan las fibras de acero en la propagación de fisuras y seguidamente, se detalla el comportamiento mecánico del HUARRF.

2.2.6 Función de las fibras en la propagación de fisuras

En este apartado se describe el papel que desempeñan las fibras de acero en el control de la fisuración. Como se ha comentado con anterioridad, la incorporación de fibras en la matriz cementicia mejora la ductilidad del hormigón. En un hormigón sin fibras, al aplicar una carga sobre él, la microfisuración es dispersa y el hormigón presenta un comportamiento elástico lineal. Con el crecimiento de la carga, las tensiones se concentran en los bordes de las fisuras y la microfisuración empieza a ser más pronunciada hasta alcanzar un punto en el cual el proceso de propagación de fisuras es inestable. La Figura 2.5.a) muestra las tensiones concentradas en los extremos de las microfisuras en un hormigón sin fibras.

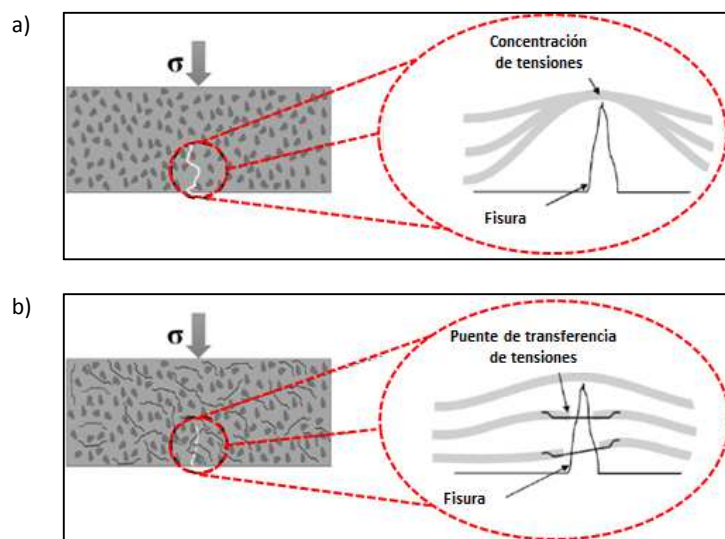


Figura 2.5 Mecanismo de transferencia de tensiones: a) hormigón sin fibras, b) hormigón con fibras (Adaptado de Casagrande C.A., 2014)

En cambio, al introducir fibras de acero en la matriz cementicia, éstas actúan como mecanismo de transferencia de tensiones a través de las fisuras del hormigón, aumentando la energía asociada a rotura en tracción. La Figura 2.5.b) muestra dicho puente de transferencia de

tensiones que tiene lugar gracias a la utilización de fibras. Con la incorporación de fibras en la matriz cementicia, el hormigón deja de presentar un comportamiento marcadamente frágil para pasar a presentar propiedades de ductilidad (Casagrande C.A., 2014).

Así pues, al reforzar la matriz con fibras, se controla la propagación de las fisuras. Además, el hormigón manifiesta un comportamiento global pseudo-dúctil, sin presentar deformación plástica apreciable pero mostrando capacidad de absorber energía después de la fisuración, lo que le confiere resistencia residual.

2.2.7 Comportamiento mecánico del HUARRF

En este apartado se explica con detalle el comportamiento mecánico del HUARRF. Como ya se ha comentado, las fibras de acero comienzan a trabajar tras la aparición de la primera fisura ya que éstas tienen la función de soportar las tracciones tras la fisuración del hormigón. Por tanto, lo interesante de la contribución de las fibras no es el incremento de la resistencia pico, sino el aumento de la resistencia residual (Barros J. A. O. *et al.*, 2005). El HUARRF puede ser considerado una variante del principio de refuerzo con barras de acero pero la manera de trabajar de las fibras es diferente a la del armado convencional.

En el hormigón armado convencional, las barras están ancladas de forma que se alcanza el límite elástico del acero y su capacidad última se desarrolla cuando tiene lugar la rotura del acero. Sin embargo, las fibras de acero se diseñan para que no alcancen el límite elástico del acero ya que antes de alcanzarlo deben deslizarse para desarrollar su máxima eficiencia (Blanco A., 2008). Ello se debe a que todas las fibras que cosen una fisura no tienen la misma longitud de anclaje y orientación. Por tanto, las deformaciones en las diversas fibras durante la abertura de la fisura son muy distintas, existiendo la posibilidad de que algunas de ellas rompan mientras que otras aún están sometidas a tracciones bajas (ver Figura 2.6.a). No obstante, si las fibras deslizan en lugar de romperse, su resistencia total a tracción será muy interesante, consiguiendo además una gran ductilidad (ver Figura 2.6.b). Por ello, la longitud de anclaje debe ser suficientemente grande para garantizar la adherencia y suficientemente pequeña para permitir el deslizamiento de las fibras. Cabe mencionar que en la Figura 2.6 también se observa el deslizamiento elástico que se produce antes de alcanzar la tensión de rotura.

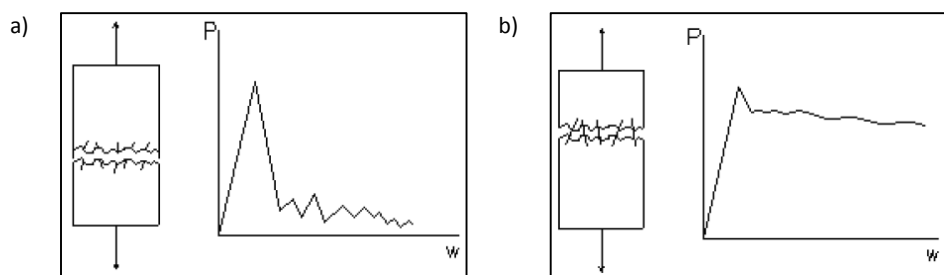


Figura 2.6 Relación carga-desplazamiento para: a) Rotura de fibras, b) Deslizamiento de fibras (Blanco A., 2008)

Por otro lado, los ensayos a tracción más utilizados son los de tracción axial y los de flexotracción, cuyas deformaciones resultantes, que se deben a la aplicación de tensiones, se denominan de deformación (*strain*) y de deflexión (*deflection*), respectivamente. Además, el comportamiento mecánico postfisuración del HRF se determina en función del volumen crítico de fibras. Así pues, cuando la adición de fibras es inferior al volumen crítico, el hormigón

presenta un comportamiento de ablandamiento (*softening*) y cuando la adición es superior, manifiesta un comportamiento de endurecimiento (*hardening*) (Naaman A.E., Reinhardt H.W., 2003; Wille K. *et al.*, 2014).

El fenómeno de *softening* consiste en un decrecimiento gradual de la resistencia mecánica bajo un incremento continuo de deformación impuesto sobre un material o estructura. Éste es un comportamiento típico de materiales cuasi-frágiles como el hormigón convencional, el cual rompe debido a un proceso de crecimiento progresivo de fisuras internas. En cambio, el fenómeno de *hardening* consiste en un aumento de la resistencia mecánica hasta alcanzar el nivel máximo de esfuerzos. A partir de ese instante, la resistencia decrece hasta llegar a la rotura del material. Así pues, el fenómeno de *softening* correspondería al comportamiento del hormigón armado convencional y el fenómeno de *hardening*, al comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero, éste último ya mostrado en la Figura 2.6.

A continuación, relacionando estos dos fenómenos con las deformaciones resultantes de los ensayos a tracción axial y flexotracción, se obtiene una clasificación del comportamiento mecánico del hormigón. El hormigón presenta un comportamiento de *deflection/strain-hardening* cuando la capacidad de resistencia residual es superior a la carga en el momento de la rotura de la matriz en los ensayos a flexotracción y tracción axial, respectivamente. En cambio, presenta un comportamiento de *deflection/strain-softening* cuando dicha resistencia es inferior a la carga de rotura. En los hormigones de ultra-alta resistencia, el comportamiento mecánico más observado es de *deflection/strain-hardening*. Ello se debe a que el volumen de fibras añadido es superior al volumen crítico, que tiene lugar a partir de la incorporación de un 1% de fibras en volumen (Naaman A. E., 2003).

La Figura 2.7 muestra los diferentes comportamientos del HRF relacionados con los fenómenos de *softening* y *hardening*. Por una parte, se observa que antes de la fisuración de la matriz, ésta y las fibras trabajan conjuntamente. Por otra parte, se observa que después de la formación de la fisura localizada, se inicia el arrancamiento de la fibra y antes de dicho arrancamiento, es decir, en la etapa anterior donde tiene lugar el fenómeno de *hardening*, la fibra intenta volver a su forma original para facilitar el deslizamiento de la matriz (Bentur A., Mindess S., 2007).

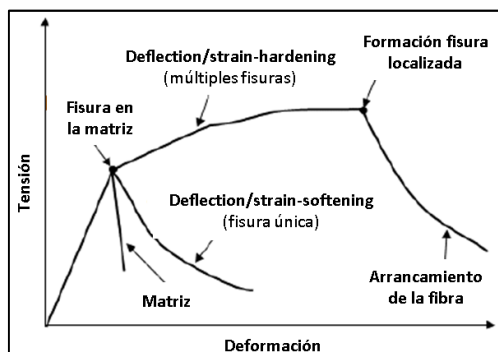


Figura 2.7 Comportamiento mecánico del HRF (Adaptado de Casagrande C.A., 2014)

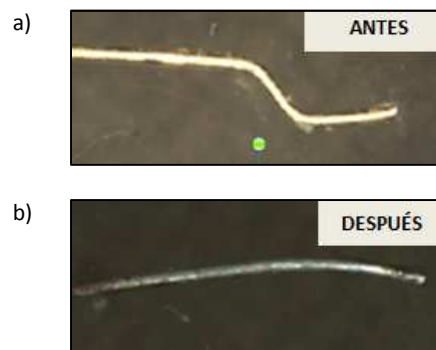


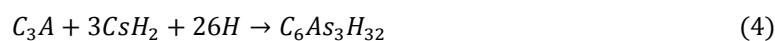
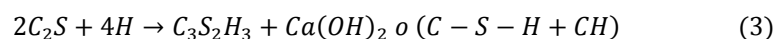
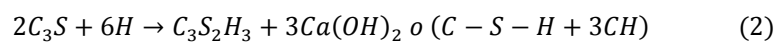
Figura 2.8 Fibra con extremos en gancho: a) Antes del arrancamiento, b) Después del arrancamiento (Abu-Lebdeh T. *et al.*, 2011)

Estos esfuerzos producen un aumento de la tensión de arrancamiento de la fibra lo que incrementa la fricción y la energía necesaria para arrancar la fibra de la matriz. La Figura 2.8 muestra una imagen de una fibra de acero con extremos en gancho antes de ser introducida en la matriz y otra imagen de dicha fibra después de ser arrancada de la matriz, donde se observa la deformación que sufre la fibra para facilitar el deslizamiento.

Una vez explicado el comportamiento mecánico del HUARRFA, los parámetros que afectan a dicho comportamiento y la función de las fibras en la propagación de fisuras, es fundamental conocer la interacción entre la fibra y la matriz. Esta zona es la región más débil de los hormigones reforzados con fibras y una mejora en sus propiedades, implicaría una mejora en las propiedades del material.

2.3 Interfase fibra-matriz

Las características de la zona de transición (ZT) entre la fibra de acero y la matriz en los HUARRF son similares a las características de la región entre la pasta y el árido grueso en los hormigones convencionales. De hecho, cuando se añaden fibras en el hormigón, se forma una película de agua alrededor de ellas y se concentran menos partículas cementicias en esta zona que en el resto del hormigón, tal y como sucede alrededor del árido grueso en los hormigones convencionales. Además, con la evolución de la hidratación del cemento, en la ZT se forman cristales de portlandita (Ca(OH)_2) resultantes de la hidratación del silicato tricálcico (C_3S) y del silicato dicálcico (C_2S) (ecuaciones (2) y (3), respectivamente). Por otro lado, también se forman agujas de etringita resultantes de las reacciones del yeso y del aluminato tricálcico (C_3A) (ecuación (4)). Así pues, debido a las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento, la ZT resulta porosa lo que le confiere poca resistencia mecánica favoreciendo la propagación de fisuras.



La zona de transición está formada por tres capas bien diferenciadas: la capa dúplex, la capa de Ca(OH)_2 y la capa porosa. La capa más próxima a la fibra es la capa dúplex. Se trata de una capa fina que separa la fibra de acero de la matriz. La segunda capa es una capa más espesa con alta concentración de Ca(OH)_2 y la tercera capa es una capa muy porosa que hace de interfase con la matriz. Esta última capa está compuesta generalmente por etringita, portlandita y silicato de calcio hidratado (C-S-H) en menor concentración (Markovic I., 2006). La Figura 2.9.a) muestra la sección transversal de una fibra de acero donde se observan las diferentes capas que componen la zona de transición y la Figura 2.9.b) muestra la interfase fibra-matriz de un HUARRFA tomada por SEM (microscopía electrónica de barrido).

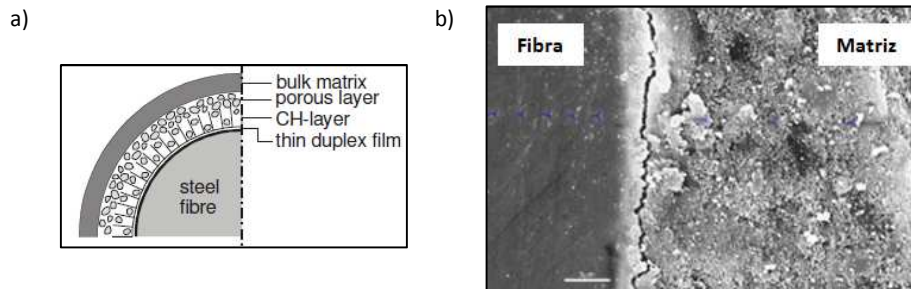


Figura 2.9 Interfase fibra-matriz: a) Capas ZT (Markovic I., 2006), b) Imagen SEM (Garas V. Y. et al., 2012)

Continuando con las características de la ZT, existen dos puntos débiles en dicha zona. El primero de ellos se localiza entre la capa dúplex y la capa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el segundo de ellos se encuentra entre la capa porosa y la matriz cementicia. Cabe señalar que, normalmente, las fibras sometidas a esfuerzos de tracción son arrancadas de la matriz en la región de la capa dúplex pero como están distribuidas aleatoriamente en la matriz, las tensiones pueden desviarse de la superficie concentrándose en la zona de interfase de la capa porosa con la pasta. Ello generaría fisuras iniciadas en la matriz y propagadas hacia la fibra de entre 10 y $40\mu\text{m}$ (Bentur A. *et al.*, 1985).

Como ya se ha comentado, la zona de transición es porosa debido a las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento. No obstante, en los HUAR esta zona es más reducida y menos porosa gracias a la adición de altas cantidades de material puzolánico, de la baja relación a/c y de presentar una estructura compacta. Ello demuestra que en los HUARRFA la interfase fibra-matriz depende de la composición de la matriz, pudiendo aumentar o disminuir su calidad dependiendo de la dosificación empleada. Aun así, los cristales de hidróxido de calcio y la capa porosa continúan estando muy presentes demostrando que la adición de puzolanas no es suficiente para acabar con la ZT (Kang S. H. *et al.*, 2012). De hecho, la ZT es de 30 a 50% más débil que la matriz, razón por la cual esta zona presenta una porosidad mayor. Por otro lado, cuanto menor es la relación a/c mayor es la dureza del material, tal y como se observa en la Figura 2.10. Asimismo, se estima que la interfase presenta un espesor del orden de los $75\mu\text{m}$, independientemente de la relación a/c (Markovic I., 2006).

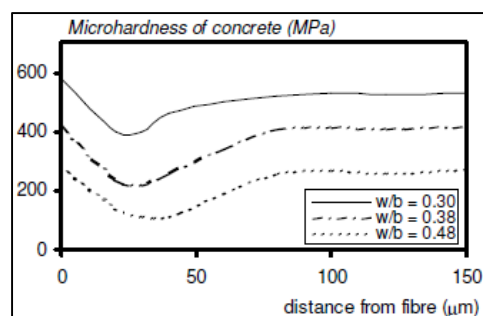


Figura 2.10 Microdureza alrededor de la fibra de acero para diferentes relaciones de a/c (Markovic I., 2006)

En los hormigones reforzados con fibras, la interacción entre la fibra y la matriz es fundamental cuando el material es sometido a esfuerzos. Durante las primeras etapas de carga, la interacción es elástica ya que las fibras y la matriz están adheridas, siendo la resistencia al cizallamiento en la interfase superior a la tensión de cizallamiento. Ello permite

que las deformaciones entre ambas sean compatibles y que no se produzca desplazamiento relativo entre ellas. Sin embargo, cuando la tensión de cizallamiento es superior a la resistencia al cizallamiento en la interfase, se pasa de un mecanismo de transferencia de tensiones elástico a uno por fricción con el cual se inicia el desplazamiento de la fibra. Cuando el desplazamiento es completo, la fibra empieza a deslizar y posteriormente es arrancada de la matriz (Bentur A. *et al.*, 1985). La Figura 2.11 muestra los mecanismos mencionados de transferencia de tensiones.

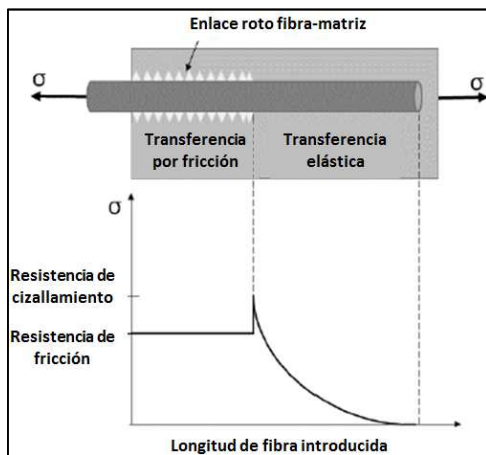


Figura 2.11 Diagrama de la distribución de tensiones elástica y por fricción en hormigones reforzados con fibras (Adaptado de Casagrande C. A., 2014)

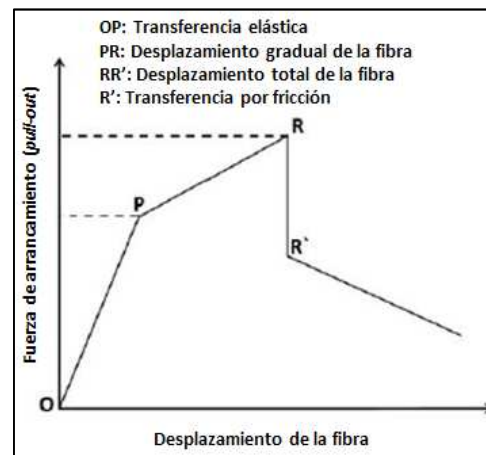


Figura 2.12 Diagrama de la fuerza al arrancamiento de las fibras de acero en la matriz cementicia (Adaptado de Casagrande C.A., 2014)

Por otra parte, según las referencias consultadas, las fibras de acero presentan un mismo modelo característico de comportamiento cuando se arranca la fibra de la matriz (Bartos P., 1981). Este modelo presenta una primera etapa caracterizada por la transferencia elástica donde la interfase permanece intacta (línea OP). Una segunda etapa caracterizada por el desplazamiento gradual de la fibra (línea PR). Una tercera etapa caracterizada por el desplazamiento total de la fibra (línea RR'). Y una cuarta etapa donde la fibra es arrancada de la matriz de forma gradual debido a la transferencia por fricción (a partir del punto R'). La Figura 2.12 muestra dicho modelo característico de comportamiento donde se observa la evolución de la fuerza necesaria para arrancar las fibras de acero de la matriz cementicia.

No obstante, aunque todas las fibras de acero presentan el mismo modelo característico de comportamiento frente al arrancamiento, la respuesta mecánica de los mecanismos de transferencia de tensiones elástico y por fricción pueden variar mucho dependiendo del tipo de fibra adicionada (Kim D. J. *et al.*, 2008; Naaman A. E., 2012). La Figura 2.13.a) muestra el comportamiento de diferentes tipos de fibras metálicas al ser arrancadas de la matriz. Se observa que todas las fibras ensayadas presentan una deformación elástica similar (tramo OA), independientemente de su geometría. A partir de este tramo, cada fibra se comporta de manera diferente.

Por un lado, la fibra lisa, una vez producido el desplazamiento total, presenta un intenso decrecimiento de la fuerza de arrancamiento debido a que este tipo de fibra no favorece el anclaje en la matriz. Por otro lado, la fibra con extremos en gancho presenta un aumento de la tensión que corresponde al desplazamiento gradual de la fibra hasta la tensión máxima (tramo

AA'). Esta tensión máxima indica el desplazamiento total de la fibra y la rectificación de sus extremos para conseguir que la fibra presente un aspecto liso y que así comience a trabajar el mecanismo de transferencia por fricción. Por último, la fibra trenzada presenta un comportamiento superior (tramo AD) debido a la dificultad para rectificar este tipo de fibra hasta conseguir un aspecto liso y que de esta manera solo actúen las fuerzas por fricción. Las Figuras 2.13.b) y 2.13.c) recogen el aspecto que presentan muestras de fibras trenzadas y de fibras con extremos en gancho antes y después del ensayo. Este ensayo de caracterización del hormigón se conoce como ensayo *pull-out*.

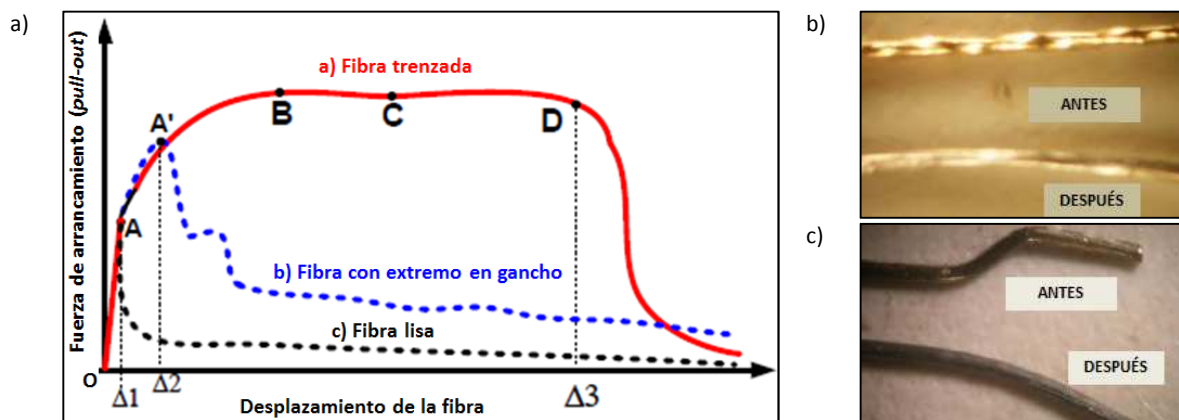


Figura 2.13 Fuerza al arrancar diferentes tipos de fibras: a) Diagrama de comportamiento de las fibras (Adaptado de Naaman A. E., 2012), b) Fibras trenzadas antes y después del ensayo, c) Fibras con extremos en gancho antes y después del ensayo (Kim D. J. et al., 2008)

Así pues, una vez explicados los factores que afectan al comportamiento del HUARRFA y las propiedades que presenta la interfase fibra-matriz, se procede a explicar los ensayos más adecuados para caracterizar este tipo de hormigón.

2.4 Caracterización del HUARRF

Como ya se ha repetido en varias ocasiones a lo largo del capítulo, el hormigón con fibras mejora varias de las características del hormigón armado convencional, principalmente los aspectos de tenacidad, control de la fisuración y resistencia a flexotracción. Con la adición de fibras en un material frágil como el hormigón, se busca convertir dicho material en uno que presente características de ductilidad. Además, se pretende actuar sobre la fisuración de la matriz, cosiendo las fisuras y reduciendo el ancho de las mismas.

Por otro lado, la transmisión de esfuerzos fibra-matriz se produce por adherencia, al superponer acciones que involucran fenómenos de adhesión, fricción y entrecruzamiento mecánico. Por ello, un aspecto importante es conocer el comportamiento mecánico a tracción del HUARRFA ya que se puede relacionar con los mecanismos de fallo de adherencia y de interfase friccional, desarrollados a lo largo de la interfase fibra-matriz. La resistencia de rotura a tracción se puede caracterizar mediante la relación entre la tensión a tracción y la respuesta de la apertura de la fisura (σ -w) (Hillerborg A. et al., 1976). En este modelo los parámetros principales son la resistencia a tracción, la energía de rotura y la forma de la curva σ -w. Cabe señalar que para el HUARRF, esta curva varía en función del tipo de fibra, del volumen de ésta incorporado a la mezcla y de la calidad del hormigón, entre otros factores.

Asimismo, otro parámetro de interés es la absorción de energía que se calcula integrando el área que encierra la curva carga-desplazamiento, obtenida a partir de ensayos como por ejemplo el de flexotracción o el ensayo Barcelona. Del análisis de los resultados de estos ensayos se extrae que cuanto mayor sea la absorción de energía de la muestra, ésta será más capaz de soportar una carga en el estado de fisuración.

Así pues, debido a la importancia de parámetros como el comportamiento mecánico a tracción y la absorción de energía, es fundamental elegir aquellos métodos de ensayo que sean más apropiados para determinar sus valores y mantener un control sobre éstos. A la hora de establecer los métodos de ensayos más adecuados para un material, se identifican varios criterios para su idoneidad. Entre dichos criterios se considera la complejidad asociada al ensayo (preparación de las probetas, configuración y ejecución del ensayo), la capacidad de ser reproducible en diferentes laboratorios, la fiabilidad y la dispersión asociada a los resultados, los costes de realización y la aceptación del método de ensayo por la comunidad científica (Kooiman A. G., 2000).

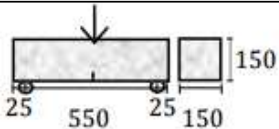
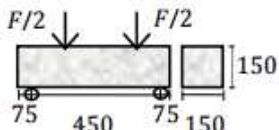
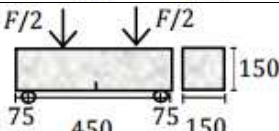
En este apartado, se centra la atención en los ensayos de flexotracción, en uno de los ensayos de doble punzonamiento conocido como el ensayo Barcelona y en los ensayos *pull-out*. Puesto que una parte de las campañas experimentales del presente trabajo se basa en el estudio de estos ensayos, se cree conveniente realizar una revisión de la literatura relacionada con estos tres tipos de ensayo de caracterización del hormigón.

2.4.1 Ensayos de flexotracción

Existen normativas y recomendaciones que plantean el uso de diferentes ensayos para la caracterización del hormigón reforzado con fibras. El más habitual para el control de este material es el ensayo de flexotracción sobre probetas prismáticas. El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a flexotracción del hormigón, centrandolo en la resistencia residual que se da tras la aparición de la primera fisura. El ensayo de flexotracción presenta dos variaciones relacionadas con su configuración y ejecución. Estas dos variaciones se basan en el número de puntos de aplicación de carga para llevar el material hasta rotura. En una de las variaciones se aplica una carga puntual en el centro de la probeta (*three-point bending test*) mientras que en la otra se aplican dos cargas puntuales a tercios de la luz (*four-point bending test*).

La norma española UNE 14651 y las recomendaciones RILEM optan por el uso del *three-point bending test* mientras que la norma alemana DIN 1048, la belga NBN B 15-238 y la italiana UNI 11039 optan por el *four-point bending test*. La Tabla 2.3 recoge esta clasificación y además, muestra las dimensiones de la probeta requerida para realizar el ensayo. Cabe mencionar que a las probetas ensayadas siguiendo las normas española e italiana y las recomendaciones RILEM, se les realiza una entalla en el centro de vano. El centro de la probeta coincide con el punto de momento máximo de la carga o cargas puntuales aplicadas, localizando la fisura en el punto de la entalla. Además, la zona de la entalla es la sección más débil de la probeta.

Tabla 2.3 Ensayo de flexotracción en normativas europeas

TIPO DE ENSAYO	NORMATIVA	CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO	DIMENSIONES DE LA PROBETA (mm)
<i>three-point bending test</i>	UNE 14651		150x150x600
	RILEM TEST		
<i>four-point bending test</i>	DIN 1048		
	NBN B 15-238		
	UNI 11039		

En el presente trabajo, los ensayos de flexotracción se realizarán siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 16651:2007+A1. Según esta norma, el ensayo se realiza sobre probetas de 150x150x600 mm que se apoyan sobre rodillos separados a una distancia de 500 mm y se aplica la carga en el centro de vano. Además, las probetas presentan una entalla de 25 mm de profundidad en el centro para controlar el lugar de aparición de la fisura y su apertura mediante el dispositivo CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*). Por otro lado, al tratarse de probetas pesadas, la preparación y la configuración del ensayo resultan laboriosas. Además, este tipo de ensayos presenta una alta dispersión en los resultados obtenidos ya que dependen directamente del número de fibras que cosen la sección fisurada.

2.4.2 Ensayo Barcelona

El Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) desarrolló el ensayo Barcelona como alternativa a los mencionados ensayos de flexotracción, ya que éstos presentan altos coeficientes de variación y sus probetas son difíciles de manipular (Molins C. *et al.*, 2009). El ensayo Barcelona permite determinar la resistencia a la fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras. Dicho ensayo se encuentra recogido en la norma UNE 83515 y se trata de una extensión del ensayo de doble punzonamiento (*Double Punch Test, DPT*) ideado por Chen (Chen F. W., 1970).

El ensayo Barcelona consiste en la transmisión de una carga de compresión sobre probetas cilíndricas de HRF de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura. Las probetas se colocan verticalmente en la máquina de ensayo y la carga se aplica a través de dos discos de acero, que se sitúan en la cara superior e inferior de la probeta y cuyos diámetros deben ser de un cuarto del diámetro de la probeta. Asimismo, se emplea una cadena extensométrica situada a media altura de la probeta para determinar la deformación circunferencial (*Total Circumferential Opening Displacement, TCOD*). La Figura 2.14 muestra la configuración del ensayo Barcelona.

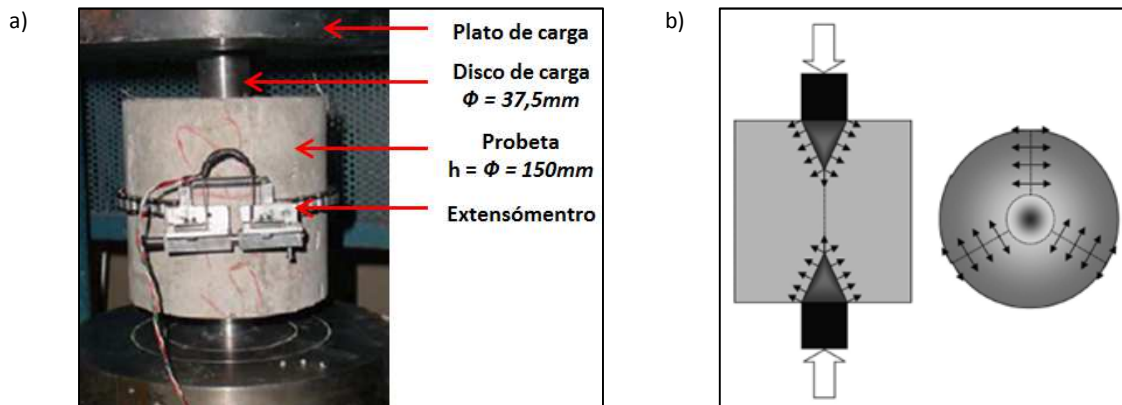


Figura 2.14 Ensayo Barcelona: a) Configuración del ensayo, b) Esfuerzos de tracción desarrollados (Carmona S., et al., 2009)

Como ya se ha comentado, el ensayo Barcelona es una buena alternativa a los ensayos de flexotracción. Entre las ventajas que presenta este ensayo de tracción indirecta se encuentra el ahorro de material y el ahorro de tiempo de ensayo. Por un lado, se ahorra material ya que se puede fabricar un número mayor de probetas con el mismo material requerido para fabricar probetas de 150x150x600 mm y además, como las probetas del ensayo Barcelona son más pequeñas y ligeras, también son más manejables. Por otro lado, se ahorra tiempo de ensayo ya que el tiempo de realización del ensayo Barcelona es más corto que el de flexotracción. Asimismo, se reduce la dispersión de los resultados al presentar una superficie específica de rotura mayor (Molins C. et al., 2009). Cabe mencionar que la equivalencia entre el ensayo de flexotracción y el ensayo Barcelona se realiza en términos de absorción de energía para los diferentes parámetros medidos: carga-desplazamiento vertical en el ensayo de flexotracción y carga-deformación circunferencial en el ensayo Barcelona.

2.4.3 Ensayo pull-out

El ensayo *pull-out*, también conocido como ensayo de arrancamiento, es el más extendido para obtener información sobre la región de la interfase fibra-matriz en los HRF. Durante la realización del ensayo, se inicia el proceso de deslizamiento-arrancamiento de la fibra que depende de las interacciones fibra-matriz y de la longitud de la fibra embebida en el hormigón. Así pues, se puede considerar que el ensayo *pull-out* es apropiado para simular los mecanismos que tienen lugar alrededor de la fibra.

Asimismo, este ensayo permite analizar los mecanismos de transferencia de tensiones elástico y por fricción que presentan las fibras de acero cuando son arrancadas de la matriz. Cabe recordar que estos mecanismos de transferencias han sido explicados detalladamente en el apartado 2.3 *Interfase fibra-matriz*. No obstante, a continuación se comenta de nuevo el comportamiento característico que presenta el ensayo *pull-out*. Dicho comportamiento está dividido en una primera etapa caracterizada por una región elástica hasta la primera fisura de la interfase, una segunda etapa caracterizada por una región de deslizamiento a partir de la primera fisura de la matriz hasta el pico de tensión y una tercera etapa caracterizada por una región de arrancamiento de la fibra a partir del pico de tensión donde predomina el mecanismo de transferencia por fricción.

Según la bibliografía consultada, uno de los ensayos *pull-out* más realizados es el de arrancamiento de fibra única que, como su nombre indica, se trata de insertar una única fibra en el extremo de una muestra de hormigón y que ésta esté alineada con el esfuerzo de tracción al que será sometida (Bentur A. *et al.*, 1985; Banholzer B. *et al.*, 2006). En cambio, otro de los ensayos *pull-out* cuyo uso también está muy extendido es un modelo que se asemeja al ensayo de tracción axil. Este ensayo consiste en la tracción de dos partes iguales de hormigón con una única fibra o múltiples fibras embebidas en la zona de contacto entre ambas partes y completamente alineadas con la tensión aplicada (Chan Y.-W., Chu S.-H., 2004; Won J.-P. *et al.*, 2013). No obstante, ambos tipos de ensayos *pull-out* se basan en cuantificar la tensión necesaria para arrancar la fibra de la matriz. La Figura 2.15 muestra la configuración de las diferentes modalidades de ensayo *pull-out* acabadas de explicar.

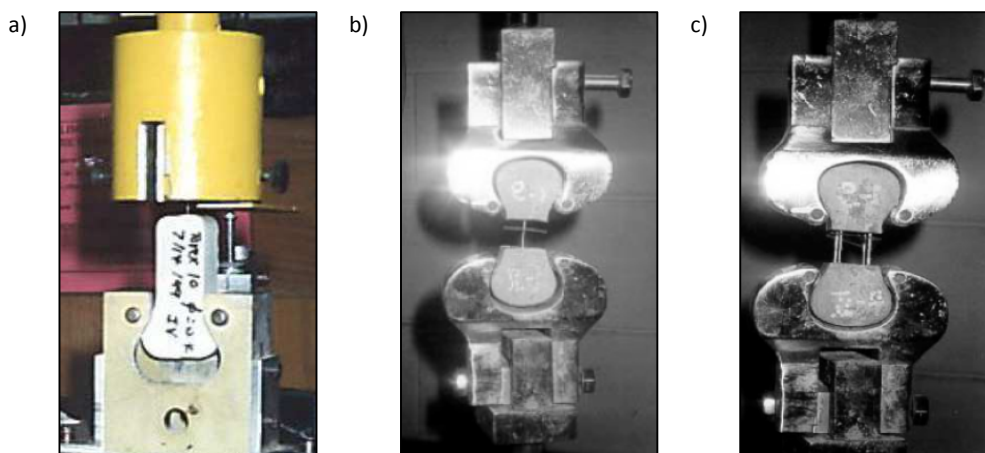


Figura 2.15 Ensayo *pull-out*: a) Fibra única insertada en una muestra de hormigón (Naaman A. E., 2012), b) Fibra única embebida en una muestra de hormigón, c) Múltiples fibras embebidas en una muestra de hormigón (Won J.-P. *et al.*, 2006)

Cabe señalar que el resultado del ensayo depende de varios factores incluyendo la orientación de las fibras, la geometría de éstas, la longitud de fibra embebida y la resistencia de la matriz (Lee Y. *et al.*, 2010). También depende de posibles tratamientos realizados a la superficie de las fibras para mejorar la interfase fibra-matriz, que se explicarán en el próximo apartado 2.5 *Funcionalización de silanos* (Li V. C. *et al.*, 1990).

Volviendo al ensayo *pull-out*, éste mide el desplazamiento de la fibra, generalmente mediante unos *LVDT* (*Lineal Variable Differential Transformers*) acoplados a la máquina. Los resultados son presentados en forma de gráficos carga-desplazamiento y para determinar la energía necesaria para arrancar las fibras de la matriz, se calcula el área bajo la curva generada en el ensayo. Cabe mencionar que los ensayos *pull-out* no están estandarizados y aunque hay varios métodos y modelos matemáticos desarrollados, la comparación entre ellos es difícil.

Una vez comentado el ensayo *pull-out*, se ha completado la explicación de los ensayos más usados de caracterización del HUARRF: ensayos de flexotracción, ensayo Barcelona y ensayo *pull-out*. No obstante, también se considera interesante determinar la velocidad de evolución del calor generado durante la hidratación del hormigón para estudiar si su hidratación es temprana o tardía. Así pues, a continuación se explica este ensayo que se realiza al hormigón en estado fresco.

2.4.4 Calorimetría

La calorimetría es un ensayo gracias al cual se determina la evolución del calor generado durante la hidratación del hormigón. El calor de hidratación se genera por la reacción entre el cemento y el agua. La cantidad de calor generado depende de la composición química del cemento, siendo el aluminato tricálcico (C_3A) y el silicato tricálcico (C_3S) los compuestos más importantes para la evolución del calor. No obstante, la relación a/c, la finura del cemento y la temperatura de curado también son factores que afectan a la hidratación. Así, un incremento de la cantidad de cemento, de la finura y de la temperatura de curado aumenta el calor de hidratación.

Por otro lado, aunque el cemento puede liberar calor durante muchos años, la tasa de generación de calor es mayor en las edades tempranas. De hecho, se genera una gran cantidad de calor en los tres primeros días, teniendo lugar la mayor tasa de liberación de calor a lo largo de las primeras 24 horas. La Figura 2.16 representa las etapas de hidratación de un cemento Portland, mostrando la velocidad de evolución del calor en función del tiempo (Gartner E. M. *et al.*, 2002).

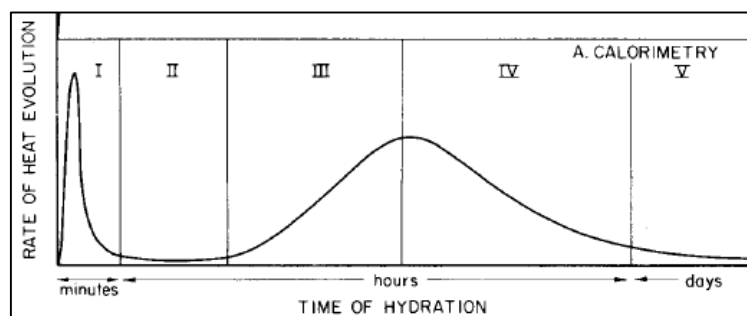


Figura 2.16 Evolución del calor de hidratación de un cemento Portland tipo I (Gartner E. M. *et al.*, 2002)

En la etapa 1, conocida como periodo inicial o de preinducción, aparece el primer pico que se debe a la liberación de calor por las reacciones iniciales de los compuestos del cemento, tales como el C_3A y el yeso, formando etringita. Esta evolución de calor, que es rápida, cesa después de unos 15 minutos. La etapa 2, conocida como periodo de incubación o inducción, se caracteriza por un periodo de baja reactividad en el cual el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados son muy pequeños. Esto explica que el hormigón quede manejable durante un determinado tiempo. La etapa 2 finaliza después de 1 a 3 horas.

El fraguado inicial empieza en la etapa 3. Asimismo, aparece un segundo pico atribuido a la hidratación del C_3S que indica el fin del fraguado final y el comienzo del proceso de endurecimiento de la pasta. Esta etapa dura de 2 a 8 horas. En la etapa 4, conocida como periodo de deceleración, se forman los productos de hidratación y se determina la tasa de aumento de resistencia inicial. Esta etapa termina después de 12 a 24 horas. Por último, en la etapa 5, conocida como periodo de difusión estacionario, la difusión es muy lenta y sigue disminuyendo hasta que no haya más C_3S a hidratar. Por otro lado, se estabiliza la tasa de aumento de resistencia a edades avanzadas.

Con la descripción del ensayo de calorimetría, se finaliza el apartado de caracterización del HUARRF. A continuación, se explica cómo influye la modificación de la superficie de las fibras

en la interacción fibra-matriz ya que como se ha comentado previamente, dicha modificación puede mejorar el comportamiento del HUARRF aumentando su resistencia residual. En primer lugar se explicará de forma general en qué consiste la modificación de la superficie de las fibras para refuerzo en la matriz cementicia y después, se explicará en detalle la modificación mediante la funcionalización con silanos.

2.5 Funcionalización con silanos

Una alternativa a la adición de puzolanas para mejorar la interacción fibra-matriz es la modificación de la superficie de las fibras. Esta modificación tiene como objetivo aumentar la superficie específica de las fibras por deposición de sustancias, lo que incrementa la rugosidad de las fibras y mejora la adherencia física de la fibra con la matriz.

Según la bibliografía consultada, un ejemplo de tratamiento de la superficie de las fibras de acero es la deposición de fosfato de zinc (ZnPh) en su superficie (Soulioti D. V. *et al.*, 2013). Las fibras tratadas con ZnPh requieren más energía para ser arrancadas de la matriz ya que este tratamiento mejora el anclaje de la fibra a la matriz gracias al aumento de rugosidad de la superficie de la fibra. No obstante, aunque se observa una pequeña reducción de la porosidad de la zona de transición, ésta continúa siendo porosa y la etringita, la portlandita y el C-S-H continúan estando presentes. Otro ejemplo de tratamiento consiste en revestir la superficie de las fibras de acero con una capa de esmalte cerámico (Allison P. G., *et al.*, 2012). Este nuevo tratamiento presenta las mismas ventajas e inconvenientes que el anterior. De hecho, también aumenta la rugosidad de la superficie y por tanto, la energía necesaria para arrancar la fibra es mayor pero se continúa observando la presencia de etringita e Ca(OH)_2 en la región de la interfase. Analizando estos métodos se extrae que éstos no son suficientes para eliminar o reducir significativamente la capa de la interfase entre la fibra y la matriz, ya que el espesor y la porosidad de dicha zona solo se ven levemente reducidos.

Actualmente, la mayoría de las investigaciones se centran en el comportamiento mecánico de la interfase, en la dosificación de la matriz y en cómo afectan factores como la geometría de la fibra, la resistencia de ésta y el volumen de fibras en dicho comportamiento mecánico. Sin embargo, escasean las investigaciones centradas en la mejora de la interfase fibra-matriz mediante la mejora de la superficie de las fibras.

Una técnica para llevar a cabo esta mejora de la calidad de la superficie de la fibra es la funcionalización. Se trata de una técnica muy usada en la modificación de superficies metálicas para prevenir la corrosión, atribuyéndoles características reactivas. Algunos investigadores ya han demostrado el potencial de utilizar esta técnica con moléculas de silano para mejorar las características mecánicas de los materiales cementicios, aunque en aquel momento solamente estaba enfocado en el revestimiento del humo de sílice (Xu Y., Chung D.D., 1999; Xu Y., Chung D.D., 2000). Cabe señalar que el potencial del silano se debe a que es un compuesto químico derivado del silicio que posee una excelente resistencia a la alcalinidad y una alta volatilidad (Afanador P. M., 2008). Además, su función principal es proporcionar un enlace químico fuerte y también formar una interfase con buenas propiedades mecánicas.

Siguiendo esta línea de investigación, estudios recientes han demostrado que fibras poliméricas tratadas con silano requieren más energía para ser separadas de la matriz cementicia (Benzerzour M., *et al.*, 2012). Esto se debe a que las fibras están más ancladas en la matriz gracias al aumento de la rugosidad de la superficie de dichas fibras, tal y como se observa en el Figura 2.17. Así pues, sería interesante estudiar la posibilidad de revestir las fibras de acero con silano para utilizarlas como refuerzo en matrices de ultra-alta resistencia. Con este revestimiento se pretende que las fibras tratadas reaccionen con la matriz y que al estar en contacto con la capa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la zona de transición fibra-matriz, las propiedades de dicha zona se vean mejoradas. A continuación, se detalla la funcionalización de las fibras metálicas con silano.

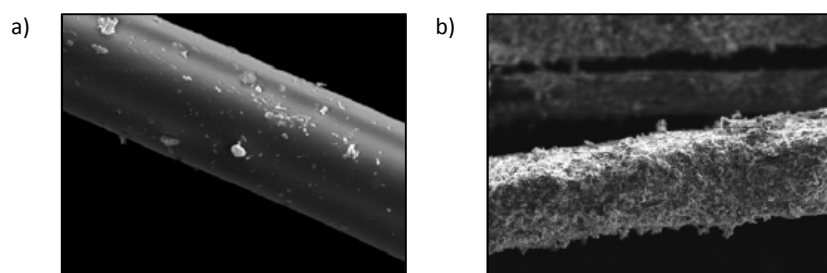


Figura 2.17 Fibras poliméricas después del ensayo pull-out: a) Sin tratar, b) Tratada con silano (Benzerzour M., *et al.*, 2012)

Como ya se ha comentado, los silanos se pueden utilizar para mejorar las propiedades de la superficie de los materiales de manera eficiente. Son unos compuestos que se pueden fijar tanto en superficies metálicas como poliméricas y cerámicas. En la actualidad, se pueden encontrar una infinidad de silanos en el mercado ya que los grupos funcionales se diversifican cada vez más, haciendo que el uso de los silanos para los procesos de producción sea cada vez más versátil. Uno de los silanos más utilizados como agente acoplante es el silano tipo TEOS (Tetraetoxisilano). Sin embargo, para hacer un uso adecuado de ellos, es necesario entender los fenómenos relacionados con su reactividad, conocidos como hidrólisis y condensación.

2.5.1 Fenómenos de hidrólisis y condensación de los silanos

A grandes rasgos, la hidrólisis del silano es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula de silano, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química (ver Figura 2.18.a). En general, el silano se encuentra en estado no hidrolizado y para que pueda reaccionar con la superficie de las fibras metálicas, primeramente necesita ser hidrolizado para generar grupos silanol ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$), que son los responsables de que el silano se ancle en la superficie de los materiales (Ooij W.J. Van *et al.*, 2005). Por otro lado, los grupos silanol son tan reactivos que pueden reaccionar entre sí condensando (ver Figura 2.18.b), lo que implica una pérdida de parte de su potencial reactivo.

La hidrólisis se puede lograr mezclando el silano con agua y opcionalmente incluyendo un disolvente tal como el alcohol para mejorar la solubilidad (Ooij W. J. Van *et al.*, 2004). El pH de la disolución se mantiene por debajo de 7, pero es preferible que el pH esté entre 4 y 6 para mejorar la hidrólisis. Así pues, es recomendable ajustar el pH. Para ello, se puede añadir un ácido, como por ejemplo ácido acético, oxálico, fórmico o propiónico. Cabe mencionar que si se permite que suba el pH por encima de 7, el silano hidrolizado puede empezar a polimerizarse mediante una reacción de condensación. Si se permite que ocurra esto, se

reducirá considerablemente la resistencia a la corrosión ya que el silano puede no unirse fuertemente a la superficie de las fibras metálicas.

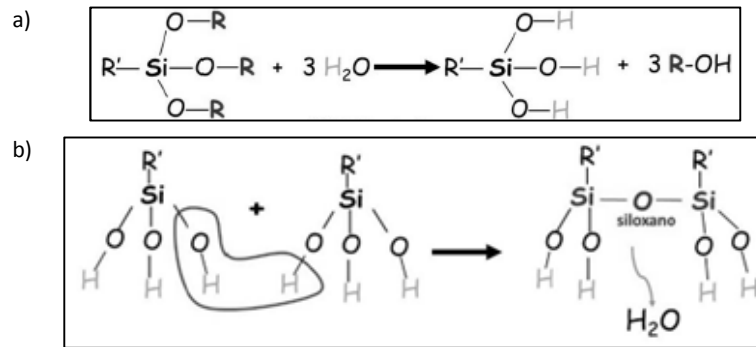


Figura 2.18 Reactividad del silano: a) Hidrólisis, b) Condensación (Casagrande C.A., 2014)

Como se ha dejado entrever en el párrafo anterior, el pH de la disolución es un parámetro que afecta a la velocidad de hidrólisis y condensación. De hecho, la mayoría de los silanos presentan alta velocidad de hidrólisis y baja velocidad de condensación en disoluciones con pH alrededor de 4, tal y como se muestra en la Figura 2.19. Analizando esta Figura, se observa que en las disoluciones con pH elevados, las reacciones de condensación son favorecidas lo que implica una condensación prematura entre los silanos. Así pues, se confirma que es preferible que el pH esté entre 4 y 5 priorizando la velocidad de hidrólisis.

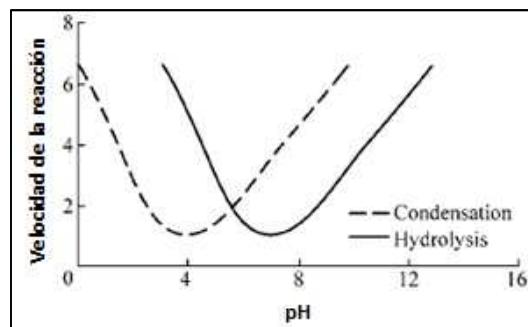


Figura 2.19 Velocidad de hidrólisis/condensación de los silanos (Ooij W.J. Van et al., 2005)

Otros parámetros que afectan a la velocidad de hidrólisis son la concentración de la disolución y el tiempo de hidrólisis. Por un lado, la concentración de silanos en la disolución debe ser de entre el 0,1 y el 10%, preferiblemente superior al 1% (Ooij W. J. Van et al., 2004). Una disolución más concentrada proporciona un mayor grosor de película en la fibra de acero, pero el coste económico es mayor. Además, las películas más gruesas son frecuentemente débiles y quebradizas. Por otro lado, el tiempo necesario para que se complete la hidrólisis puede variar de 15 minutos a 1 hora en los silanos a base de agua y de 18 a 48 horas en los silanos a base de alcohol. Si el tiempo de hidrólisis es insuficiente, la adhesión del silano a la superficie de la fibra puede verse comprometida (Ooij W.J. Van et al., 2005).

2.5.2 Unión del silano con la superficie de las fibras de acero

Las superficies metálicas son poco adherentes para los silanos debido a la oxidación espontánea de sus superficies al estar en contacto con la atmosfera. Así pues, es necesario realizar tratamientos químicos previos con el objetivo de preparar la superficie de la fibra para

facilitar su posterior funcionalización con silano. En primer lugar, es aconsejable realizar un proceso desengrasante con acetona para eliminar los residuos orgánicos adheridos a la fibra durante su etapa de fabricación. De esta manera, la superficie de la fibra queda limpia de grasa y residuos físicos. A continuación, es necesario efectuar un segundo baño en una disolución básica, como por ejemplo de NaOH, para aumentar la concentración de hidroxilas en la superficie metálica ya que éstas propician la unión del silano con la fibra. Este baño es muy necesario ya que la superficie de la fibra debe estar activada para que el recubrimiento con silano sea efectivo y se ha demostrado que las disoluciones básicas parecen ser el mejor pretratamiento antes de la aplicación del silano (Ooij W.J. Van *et al.*, 2005).

2.5.3 Formación y curado de la capa de silano

El tratamiento de las superficies con silano es un proceso relativamente simple. De hecho, en el caso de las fibras metálicas, uno de los posibles procedimientos a seguir consiste únicamente en sumergir las fibras en una disolución de silano diluida e hidrolizada y pasado un tiempo determinado, retirarlas de la disolución e introducir las en una estufa para eliminar el exceso de agua y silano. Este proceso de inmersión se conoce como *dip-coating*.

Según la bibliografía consultada, la calidad de la capa de silano debe presentar ciertas características (Ooij W.J. Van, 1999). Algunas de estas características son que el espesor de dicha capa debe ser de entre 50 y 100 nm para prevenir la corrosión y que la capa no debe presentar porosidad, lo cual se consigue habiendo realizado previamente el desengrase y el tratamiento alcalino. Respecto al tiempo de inmersión, algunos investigadores estudiaron la influencia del tiempo de inmersión de unas chapas metálicas en una disolución hidrolizada de silano (Child T., Ooij W.J. Van, 1999). Del análisis de sus resultados, se concluye que no hay aumento progresivo del espesor de la capa de silano con el aumento del tiempo de inmersión de las chapas. De hecho, el estudio sugiere que los tiempos de inmersión no sean superiores a 10 minutos ya que a partir de este tiempo se obtienen peores resultados, probablemente debido al envejecimiento de la disolución.

Por otro lado, como se ha comentado con anterioridad, una disolución más concentrada proporciona una capa de silano más espesa, tal y como se comprueba en la Figura 2.20. Analizando esta Figura, se observa que la relación directa entre el espesor de la capa de silano y la concentración de la disolución solo se cumple para disoluciones de hasta 10% de silano. De hecho, para disoluciones con una concentración mayor, esta relación ya no es lineal.

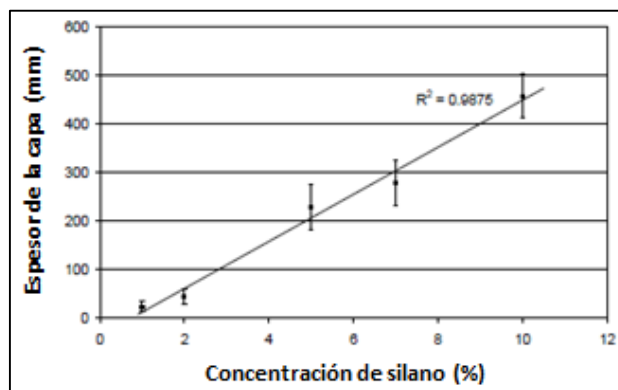


Figura 2.20 Influencia de la concentración de la disolución en el espesor de la capa de silano (Zhu D., Ooij W.J. Van., 2004)

Por último, aunque no menos importante, se explica el curado térmico de la capa de silano cuyo objetivo es eliminar el agua libre y también el exceso de silano. Cuando se elimina parte del agua presente en la capa de silano, ésta se retrae un poco lo que resulta en una reducción de su espesor haciéndola más estable y menos porosa. Diversas investigaciones comprueban que las fibras funcionalizadas que son curadas a una temperatura de entre 100 y 150 °C presentan una capa de silano menos espesa que las fibras funcionalizadas curadas a temperatura ambiente (Li G., *et al.*, 2007). Asimismo, en estas mismas investigaciones se anuncia que temperaturas de curado superiores a 150 °C no son aconsejables ya que la capa de silano presenta fisuras y cierto punto de corrosión. Cabe recalcar que es probable que esta fisuración sea resultado de un exceso de retracción debido a una temperatura de curado elevada.

2.6 Discusión

A lo largo de todo el capítulo, se ha repetido en un sinnúmero de ocasiones que la adición de fibras de acero en hormigones de ultra-alta resistencia mejora muchas de sus propiedades. De hecho, las fibras metálicas otorgan ductilidad al material y controlan su fisuración, que depende de la adherencia entre la fibra y la matriz. Infinidad de estudios resaltan que la interfase fibra-matriz es la región más débil del material, siendo la zona por donde aparecen las fisuras debido a la baja resistencia que presenta. Teniendo esto en cuenta, incrementar la adherencia entre la fibra y la matriz es una necesidad real para mejorar el comportamiento mecánico del hormigón.

Por otra parte, aunque hay diversos estudios que investigan el comportamiento mecánico de la interfase centrándose en factores como la geometría y el volumen de fibras incorporado, son pocos los que se centran en mejorar la calidad de la superficie de la fibra metálica lo que produciría directamente una mejora en la interfase fibra-matriz. Así pues, deben establecerse criterios que permitan mejorar las características de la superficie de las fibras de acero. Para ello, puede tomarse como punto de partida la bibliografía consultada que plantea el uso de la funcionalización con silanos.

Volviendo a la mejora de las propiedades del hormigón, la incorporación de la fibra metálica no compromete la resistencia estructural a compresión del material, sino que se ha comprobado que aumenta su resistencia a tracción y añade resistencia residual que los hormigones convencionales no ofrecen. Así pues, desarrollar una metodología para utilizar estas fibras como refuerzo puede ser de gran interés para la industria del hormigón.

Para ello, el primer punto a tener en cuenta sería cómo activar la superficie de la fibra para que el revestimiento de silano no se viese comprometido. Una vez conseguido, se decidiría cómo realizar la funcionalización dependiendo de los medios de los cuales se dispongan. Por último, se comprobaría su eficacia incorporando la fibra de acero tratada en una matriz de ultra-alta resistencia y realizando los ensayos de caracterización más apropiados para estudiar la nueva interfase. Si se observasen mejoras en las características de esta interfase, representaría un avance importante en el desarrollo de los hormigones reforzados con fibras.

3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En la actualidad, el uso del HRF se plantea como una alternativa cada vez más competitiva ya que las fibras, una vez incorporadas al hormigón, pueden permitir la utilización de éste como material estructural. Para mejorar las propiedades mecánicas del HRF, en los últimos años se están utilizando fibras con alto módulo de elasticidad, alta resistencia a tracción y dosificación en fibras superior al 1,5% en volumen, según la EHE-08, dando lugar al HUARRF. Este nuevo hormigón, además de presentar una mayor resistencia mecánica a compresión, presenta una mejora en su ductilidad y propiedades interesantes después de la fisuración, como alta resistencia residual.

No obstante, aunque la adición de fibras mejora las propiedades del hormigón, la utilización de éstas también presenta aspectos negativos. Algunos de estos aspectos son la pérdida de fluidez del hormigón y la presencia de zona de transición entre la fibra y la matriz cementicia. Dicha zona de transición se caracteriza por una elevada porosidad así como por una alta concentración de cristales de hidróxido de calcio.

En los hormigones reforzados con fibras, el comportamiento de la interfase entre la fibra y la matriz tiene una gran importancia en el comportamiento mecánico final del material

compuesto (Pacios A., Fernández M., 1997). Así pues, es necesario mejorar la interacción fibra-matriz y para ello, aparte de la adición de puzolanas, otra opción sería la modificación de la superficie de las fibras. El objetivo de esta modificación sería aumentar la superficie específica de las fibras por deposición de sustancias, aumentando así la rugosidad de las fibras para mejorar la adherencia física de la fibra con la matriz.

Sin embargo, la mejora de la adherencia física no implica que los cristales de hidróxido de calcio y de etringita en la interfase fibra-matriz disminuyan de tamaño o incluso desaparezcan. Por ello, también es interesante modificar químicamente la superficie de las fibras para que se produzca un enlace más estable que genere una mejor adhesión de la fibra a la pasta cementicia de ultra-alta resistencia. De esta manera, si se desarrollaran cristales, éstos serían más pequeños y formarían un entramado menos poroso.

De acuerdo con la bibliografía consultada, la funcionalización es una técnica para modificar superficies cerámicas, metálicas o poliméricas con el fin de atribuirles características reactivas que faciliten su adición en matrices cementicias. Siguiendo esta línea de investigación, se ha demostrado que la técnica de funcionalización con moléculas de silano tiene un gran potencial para mejorar los compuestos cementicios, enfocado de momento en el revestimiento del humo de sílice (Xu Y., Chung D. D., 1999; Xu Y., Chung D. D., 2000).

Por una parte, la metodología aplicada en este trabajo, la cual se encuentra en fase de desarrollo, pretende formar una capa sobre la superficie de las fibras de acero haciéndolas más adecuadas para la adición en matrices de ultra-alta resistencia. La creación de dicha capa se realiza mediante un tratamiento con silano, el objetivo del cual es reaccionar con la superficie de la matriz y modificar la morfología y las propiedades de la zona de transición fibra-matriz. Así, aunque la capa esté en contacto con el hidróxido de calcio de la zona de transición, la región de la interfase mejoraría gracias al tratamiento.

Por otra parte, una vez tratadas las fibras de acero, se fabrican HUARRF y se ensayan para caracterizar el comportamiento de dichas fibras que proceden de etapas diferentes del tratamiento. La caracterización del hormigón con fibras se evalúa mediante ensayos recogidos en la normativa española siendo el más conocido el ensayo de flexotracción, que determina la resistencia residual del material a tracción.

Cabe señalar que se realiza una campaña experimental preliminar donde se tratan las fibras, se fabrican HUARRF y se evalúan sus características mediante un par de ensayos con el objetivo de acotar las variables del tratamiento de las fibras. Así pues, una vez optimizadas las etapas de dicho tratamiento, se realiza una campaña experimental específica donde se fabrican HUARRF con aquellas fibras tratadas que hayan dado mejores resultados en la campaña previa y se estudia la caracterización del hormigón en profundidad, realizando más ensayos.

Por último, es necesario mencionar que debido a la gran cantidad de ensayos a realizar, tanto a las fibras sin tratar como al hormigón endurecido, es impensable poder llevar a cabo una campaña experimental tan ambiciosa sin ser dos personas realizando dichos ensayos, como mínimo. Por ello, se ha trabajado conjuntamente con un estudiante de doctorado.

3.1.1 Objetivos

El objetivo principal de la campaña experimental es abordar la investigación de la funcionalización de la superficie de las fibras con silano, esperando influir así en las características de la zona de transición. Ahora bien, conseguir una mejora en dicha zona puede exigir un tratamiento complejo de las fibras. Por ello, como objetivos específicos se quieren alcanzar los siguientes:

- Definir la metodología para tratar la fibra
- Proponer variaciones en las etapas del tratamiento para optimizar tanto sus parámetros como los recursos necesarios para realizar dichas etapas
- Desarrollar el tratamiento y sus variaciones para establecer con claridad las condiciones óptimas del tratamiento
- Modificar la región de la zona de transición para incrementar la adhesión de la fibra a la matriz
- Reducir la concentración de hidróxido de calcio presente en la interfase fibra-matriz gracias a la reacción con el revestimiento de silano

Si a partir del trabajo experimental se logran los objetivos específicos anteriores, un resultado esperado sería conseguir un aumento de la resistencia residual del hormigón fabricado con fibras tratadas.

3.1.2 Organización del capítulo

Primeramente, en el apartado 3.2 se define de forma general el tratamiento al cual la fibra de referencia se ha de someter para modificar su superficie y así, mejorar la interacción fibra-matriz. La razón de ser de este apartado es ofrecer al lector una primera idea de las etapas del tratamiento explicada de forma clara y concisa.

En los apartados 3.3 y 3.4 se desarrollan las campañas experimentales preliminar y específica, respectivamente. En ambas campañas se describe cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio para funcionalizar las fibras, se detallan las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo cada etapa del tratamiento y se enumeran todos los materiales utilizados. Además, se explican las variaciones estudiadas para optimizar el tratamiento. Por otra parte, se describe la fabricación de los hormigones reforzados con fibras previamente tratadas, los materiales que se usan y los ensayos a los cuales se someten las probetas para estudiar los efectos en la matriz al adicionar fibras funcionalizadas. La diferencia entre ambas campañas recae en el hecho de que la campaña preliminar es para acotar las variables que intervienen en el tratamiento, mientras que la campaña específica es para estudiar con más detalle el efecto de la fibra funcionalizada en el hormigón, utilizando las variables óptimas determinadas gracias a la campaña preliminar.

3.2 Definición general del tratamiento

Para modificar la superficie de las fibras y así provocar una zona de transición menos porosa, se ha planteado una línea de trabajo que consta de cuatro etapas bien diferenciadas: un

primer baño en acetona, un segundo baño en hidróxido de sodio (NaOH), la funcionalización de la fibra con silano del tipo TEOS y un posterior baño en hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), tal y como muestra el esquema de la Figura 3.1. Cabe señalar que la elección de TEOS se debe a que es el silano más utilizado para funcionalizar. Asimismo, el tratamiento se desarrolla teniendo en cuenta el punto de vista económico para que una futura funcionalización a gran escala sea factible.

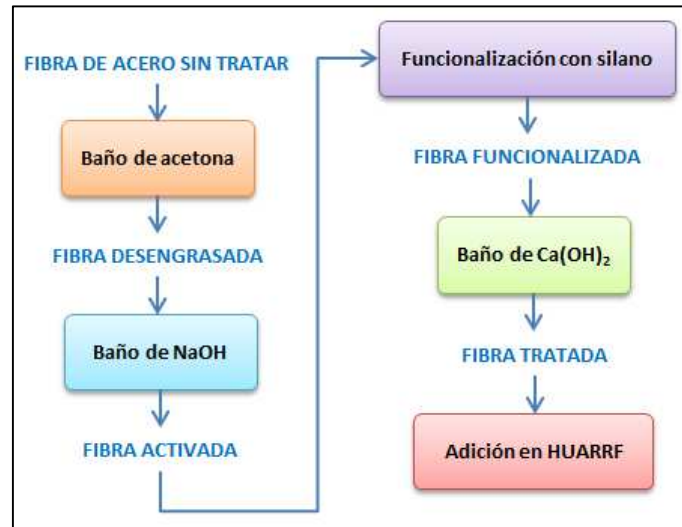


Figura 3.1 Esquema del proceso de tratamiento de la fibra de acero sin tratar

En primer lugar, se realiza un proceso desengrasante con acetona para eliminar los residuos orgánicos adheridos a la fibra durante su etapa de fabricación. De esta manera, la superficie de la fibra queda limpia de grasa y residuos físicos. Una vez las fibras están desengrasadas, se efectúa un segundo baño en una disolución de NaOH para aumentar la concentración de hidroxilas en la superficie metálica ya que éstas propician la unión del silano con la fibra, que se llevará a cabo en la etapa posterior de funcionalización. Este segundo baño es completamente necesario ya que la superficie de la fibra debe de estar activada para que el revestimiento con silano sea efectivo y se ha demostrado que las disoluciones básicas parecen ser el mejor pretratamiento antes de la aplicación del silano (Ooij W.J. Van *et al.*, 2005).

A continuación, se realiza la funcionalización de la fibra mediante un proceso *dip-coating*, que se trata de un proceso de recubrimiento por inmersión continua, en una solución de silano diluido del tipo TEOS. Al mismo tiempo, se busca optimizar la concentración de TEOS del tratamiento. Por último, se realiza un cuarto baño en una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para reaccionar con la capa de silano y favorecer así la formación de silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) durante la hidratación del cemento. De esta forma, se consigue aumentar la compatibilidad de la fibra con la matriz cementicia.

Posteriormente, se procede a la fabricación de probetas de HUARRF adicionando fibra tratada procedente de la etapa final del tratamiento así como otras probetas con fibra sin tratar, fibra desengrasada, fibra activada y fibra funcionalizada. Se fabrican hormigones con adición de fibras procedentes de todas las etapas del tratamiento para comprobar tanto las características de la fibra tratada como la efectividad de cada una de las etapas de la metodología.

3.3 Campaña experimental preliminar

Por un lado, en este apartado se describe detalladamente la metodología llevada a cabo en cada etapa del tratamiento explicando los ensayos realizados en cada una de ellas y citando el equipo de laboratorio y los productos químicos utilizados. Además, se describen los ensayos realizados a las fibras, una vez éstas son tratadas, para comprobar la efectividad del tratamiento. Por otro lado, se detalla el proceso de fabricación de las probetas de HUARRF comentando la dosificación, el equipo y los materiales utilizados y los ensayos de caracterización posteriormente realizados.


3.3.1 Funcionalización de las fibras

Como ya se ha comentado en el apartado 3.2. *Definición general del tratamiento*, el tratamiento al cual se someten las fibras para modificar su superficie y así incrementar la adhesión con la matriz cementicia, mediante alteraciones en la zona de transición fibra-matriz, se divide en cuatro etapas bien diferenciadas explicadas a continuación.

3.3.1.1 Baño desgrasante de acetona

Las fibras metálicas utilizadas en la primera etapa del tratamiento, llamadas fibras sin tratar o de referencia a lo largo de todo el trabajo, son las del tipo OL13/.16 suministradas por la empresa Bekaert S.A. Estas fibras son de acero de alta resistencia revestidas de latón y de tipo lisas. En la Tabla 3.1 se muestran las principales características de dichas fibras, según datos del fabricante.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de las fibras metálicas

PROPIEDADES	MASTERFIBER 502	
Material	Fibra de acero	
Resistencia a tracción	2000 N/mm ²	
Longitud	13 mm	
Diámetro	0,16 mm	
Esbeltez	81,25	
Densidad	7,95 g/cm ³	

Volviendo al ensayo que se ha de realizar, en primer lugar se pesa 1,5 kg de fibra sin tratar en vasos de 300 gramos cada uno de ellos. La Figura 3.2 muestra la balanza utilizada para pesar la fibra cuya precisión de lectura es de 1 g. En segundo lugar, en la cámara de extracción del laboratorio se preparan 5 litros de disolución de acetona con una concentración de 25% en volumen. Para cada litro de disolución de 25% en volumen, se necesitan 250 ml de acetona y 750 ml de agua destilada. La preparación de dicha disolución se realiza siguiendo un orden: se vierten los 250 ml de acetona en un vaso de precipitado, después los 750 ml de agua destilada y se mezcla el contenido con una varilla de vidrio. Cabe mencionar que la acetona utilizada es de la marca BOTER, con una concentración superior al 98%.



Figura 3.2 Balanza con 300 gramos de fibra sin tratar

Una vez que las disoluciones están preparadas, se llenan 5 recipientes con 1 litro de disolución cada uno de ellos, 300 gramos de fibra sin tratar previamente pesados y se tapan dichos recipientes. A continuación, se introducen los 5 recipientes en un agitador colocando 3 en un lado y 2 en el otro lado del aparato para compensar el peso. La fibra permanece 5 minutos en el agitador girando a una velocidad de 10 rpm. La Figura 3.3 muestra el aparato que, gracias a un mecanismo de rotación, mezcla homogéneamente la fibra manteniendo la velocidad constante durante la agitación.



Figura 3.3 Agitador rotatorio

Transcurrido el tiempo de agitación, se decantan las disoluciones teniendo cuidado para que no se pierda fibra. Finalmente, la fibra ya desengrasada se coloca en unas bandejas y para eliminar el exceso de disolución, se introducen en una estufa durante 12 horas a 100 °C para que la fibra se seque. Pasado el tiempo de secado, la fibra desengrasada se extrae de la estufa y se guarda para la siguiente etapa del tratamiento. La Figura 3.4.b) muestra fibra desengrasada cuya única diferencia que se aprecia a simple vista respecto a la fibra sin tratar, mostrada en la Figura 3.4.a), es que la fibra desengrasada presenta un grado de brillantez un poco más acentuado debido a la realización de la limpieza química con acetona.

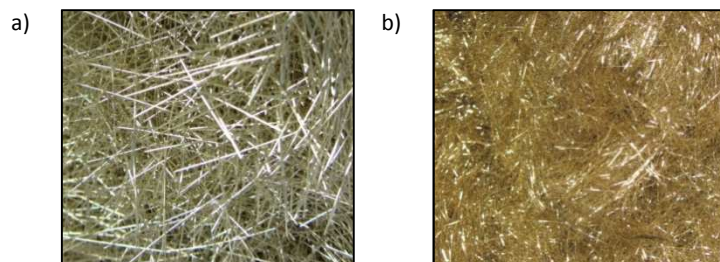


Figura 3.4 Fibra de acero: a) Fibra sin tratar, b) Fibra desengrasada

Cabe mencionar que la cantidad de fibra que se introduce en cada recipiente (300 gramos), la concentración de acetona (25% en volumen), el tiempo de inmersión y agitación (5 minutos) y el tiempo y la temperatura de secado (12 horas a 100 °C) son los parámetros que dan los mejores resultados. Estos parámetros de optimización han sido propuestos en campañas experimentales anteriores (Casagrande C. A., 2014).

El proceso se repite en varias ocasiones ya que se necesitan unos 4,8 kg de fibra desengrasada para las posteriores etapas. Así pues, teniendo en cuenta que con cada litro de disolución solamente se pueden tratar 300 gramos de fibra sin tratar, se preparan 16 litros de disolución en total y el procedimiento del agitador se repite en 4 ocasiones ya que solo se dispone de 5 recipientes adecuados para la agitación. Cabe mencionar que los residuos generados de las disoluciones se guardan para su posterior recogida y tratamiento.

3.3.1.2 Baño de hidróxido de sodio (NaOH)

La ejecución de esta fase es clave para garantizar el éxito de la etapa posterior de funcionalización ya que el baño de NaOH sirve para activar la superficie de las fibras metálicas. Así, durante la funcionalización, la capa de silano se adherirá de manera efectiva a la fibra.

La fibra que se sumerge en el baño acuoso alcalino preparado con NaOH es fibra que procede de la inmersión en acetona, es decir, es fibra desengrasada. Por ello, antes de empezar con los procesos estrictamente pertenecientes a la inmersión en NaOH, se preparan 2 vasos con 300 gramos de fibra desengrasada en cada uno de ellos.

Una vez pesada la fibra, se procede a la preparación de la disolución. Se preparan 2 litros de disolución de NaOH de concentración de 2,5% en masa, por lo que se necesitan 25 gramos de NaOH por cada litro de disolución. En el desarrollo de la preparación se sigue un orden minucioso: se ponen 50 gramos de NaOH en un vaso de precipitado, se añade agua destilada hasta la marca de los 2000 ml y se mezcla el contenido con una varilla de vidrio para evitar que el NaOH se quede pegado en el fondo del vaso. La sosa cáustica utilizada es de la marca DIRNA en formato perlas. La Figura 3.5 muestra el aspecto del NaOH, pesado en una balanza analítica cuya precisión de lectura es de 0,1 mg, así como el aspecto de la disolución.

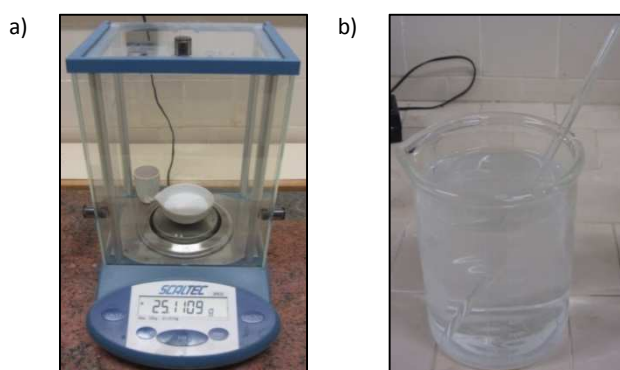


Figura 3.5 Preparación de la disolución de NaOH: a) NaOH en perlas, b) Disolución

A continuación, se llenan 2 recipientes con 1 litro de disolución cada uno de ellos, 300 gramos de fibra desengrasada, se tapan y se introducen en el agitador colocando uno a cada lado del aparato para compensar el peso. La fibra permanece 10 minutos en el agitador girando

también a una velocidad de 10 rpm. Cabe señalar que en esta etapa es muy importante respetar el tiempo de inmersión ya que el NaOH es muy corrosivo y si la fibra permanece más tiempo del necesario en la disolución, se puede deteriorar.

Así pues, transcurridos los 10 minutos de agitación, se decanta la disolución y la fibra se lava con agua destilada para quitar todo el NaOH y no continuar atacándola. Después de dicho lavado, el cual se realiza con cuidado para no perder fibra, ésta se introduce en la estufa durante 12 horas a 100 °C para que se seque. Una vez pasado el tiempo de secado, la fibra activada se extrae de la estufa y se guarda para la siguiente etapa del tratamiento. La Figura 3.6.b) muestra fibra procedente de la inmersión en NaOH donde se observa la pérdida del color dorado tan característico de la fibra desengrasada, observada en la Figura 3.6.a).

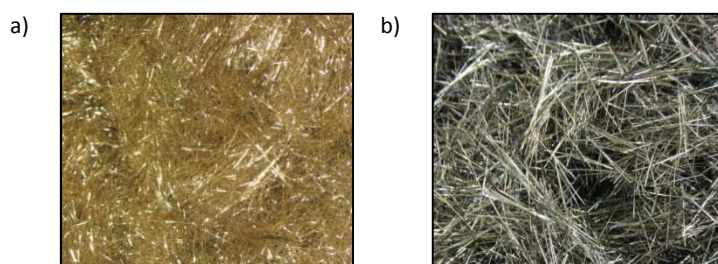


Figura 3.6 Fibra de acero: a) Fibra desengrasada, b) Fibra activada

Cabe señalar que la cantidad de fibra que se introduce en cada recipiente (300 gramos), la concentración de NaOH (2,5% en masa), el tiempo de inmersión y agitación (10 minutos) y el tiempo y la temperatura de secado (12 horas a 100 °C) son los parámetros que dan los mejores resultados. Estos parámetros de optimización también han sido propuestos en campañas experimentales anteriores (Capiotto N., 2006).

En esta etapa el proceso se repite en 4 ocasiones ya que se necesitan unos 2,4 kg de fibra tratada con NaOH para las posteriores etapas y como se ha explicado, en cada proceso se tratan solamente 600 gramos de fibra desengrasada debido a una limitación de recipientes. Cabe mencionar que los residuos generados de las disoluciones se continúan guardando para su posterior recogida y tratamiento.

3.3.1.3 Funcionalización de la fibra

Una vez finalizadas las dos primeras etapas del tratamiento donde se ha realizado primeramente una limpieza química y después una activación alcalina de la superficie de la fibra, se procede a la funcionalización de la fibra a temperatura ambiente con silano del tipo TEOS. Para optimizar la concentración de TEOS, se realizan disoluciones con concentraciones de silano de 0,1%, 1% y 10%. La elección de estas concentraciones se basa en los resultados obtenidos en estudios anteriores, donde se verificó una relación directa entre el espesor de la capa de silano formada sobre la superficie de la fibra y la concentración de silano (Zhu D., Ooij W.J. Van, 2004). De hecho, se demostró que cuanto mayor era la concentración de silano, más espesa era la capa depositada sobre la fibra. No obstante, esta relación solo se cumple para soluciones con concentraciones de hasta 10% de silano.

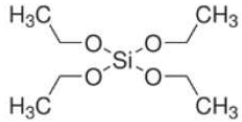
Así pues, para comprobar que las disoluciones con concentraciones de hasta 10% de silano que fueron determinadas en trabajos anteriores como óptimas realmente son las idóneas, se

realizan disoluciones con concentraciones de silano de 0,1%, 1% y 10%. Para ello, previamente se preparan 6 vasos con 300 gramos de fibra desengrasada y otros 6 vasos con 300 gramos de fibra activada ya que se pretende estudiar la efectividad de la funcionalización tanto en la fibra tratada solamente con acetona como en la fibra tratada con acetona e inmersa en NaOH.

Volviendo a las disoluciones que se han de preparar, se preparan 12 litros de disolución en la cámara de extracción del laboratorio que se diferencian entre ellas en la concentración de silano. De hecho, se preparan 4 litros con una concentración de TEOS de 0,1%, otros 4 litros con una concentración de 1% y por último, 4 litros con una concentración de 10%. Para cada litro de disolución, se necesita 1 ml de TEOS y 999 ml de disolución, 10 ml de TEOS y 990 ml de disolución y 100 ml de TEOS y 900 ml de disolución para las concentraciones de 0,1%, 1% y 10%, respectivamente.

La preparación de las disoluciones con concentración de silano de 0,1% se realiza siguiendo un orden riguroso: se vierten 500 ml de alcohol etílico en un vaso de precipitado, se añaden 500 ml de agua destilada para completar el litro de disolución y se mezcla el contenido con una varilla de vidrio. A continuación, se pipetea 1 o 2 gotas de ácido acético hasta alcanzar un valor de pH de 5,0. La razón de utilizar este ácido es que se trata de un ácido débil que permite conseguir el pH ácido deseado sin atacar la superficie de las fibras. Una vez alcanzado dicho valor de pH, se extrae 1 ml de disolución y se añade exactamente la misma cantidad de TEOS a la disolución. De forma análoga, se procede a la preparación de las disoluciones con concentraciones de silano de 1% y 10% extrayendo 10 ml y 100 ml de disolución y añadiendo 10 ml y 100 ml de TEOS, respectivamente. Cabe mencionar que el alcohol etílico utilizado es de la marca BOTER con un 96% de alcohol en volumen, el ácido acético glaciado también es de la marca BOTER con un grado de pureza de 100% y el silano tipo TEOS utilizado es de la marca Aldrich con una pureza superior al 98%, cuyas características se recogen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características del silano tipo TEOS

PROPIEDADES	SILANO
Nombre	Tetraetoxisilano
Sigla	TEOS
Fabricante	Aldrich
Pureza	> 98%
Grupo hidrolizable	Etoxi
Grupo funcional	-
Estructura molecular	

Una vez añadida la medida de TEOS, el vaso de precipitado donde se encuentra la disolución se coloca sobre un agitador magnético, se introduce un imán y se mezcla la disolución durante 1 hora para asegurar que se produce el fenómeno de la hidrólisis. El silano necesita ser hidrolizado para generar grupos silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) que son los responsables de que el silano se ancle en la superficie de la fibra. El tiempo necesario para la hidrólisis completa de los silanos puede variar de 15 minutos hasta 1 hora para silanos a base de agua y de 18 a 48 horas para silanos a base de alcohol (Ooij W.J. Van *et al.*, 2005). La Figura 3.7 muestra la agitación

magnética de los 4 litros de disolución con concentración de TEOS de 0,1%, a una velocidad de 500 rpm y a temperatura ambiente.



Figura 3.7 Agitación magnética de las disoluciones con TEOS

Cabe mencionar que el laboratorio solo dispone de dos agitadores magnéticos. Así pues, usando vasos de precipitados de 2 litros de capacidad, los 12 litros de disolución que se necesitan se tienen que preparar en 3 veces. Primero los 4 litros de disolución con concentración de TEOS de 0,1%, segundo los 4 litros con concentración de 1% y por último, los 4 litros con concentración de 10%.

Transcurrido el tiempo de hidrólisis de los 4 primeros litros de disolución, se inicia el proceso de inmersión de las fibras de acero en la solución por un tiempo de 10 minutos. Se llenan 4 recipientes con 1 litro de disolución cada uno de ellos, se ponen 300 gramos de fibras desengrasadas en 2 de los recipientes y 300 gramos de fibras procedentes del baño de NaOH en los otros 2 recipientes, se tapan y se introducen en el agitador colocando dos a cada lado del aparato para compensar el peso. Así pues, la fibra permanece 10 minutos en el agitador girando a una velocidad de 10 rpm.

Después de los 10 minutos de agitación, se retiran las fibras de la solución, se guardan los residuos para su posterior tratamiento y se elimina el exceso de silano introduciendo la fibra en la estufa durante 30 minutos a 150 °C. Una vez pasado el tiempo de secado, las fibras funcionalizadas se extraen de la estufa y se guardan para la siguiente etapa del tratamiento. A continuación, una vez transcurrido el tiempo de hidrólisis de las otras disoluciones, se continúa con el proceso de inmersión del resto de fibras. La Figura 3.8.b) muestra fibra funcionalizada en una disolución con concentración de TEOS de 1% donde se observa que la fibra ha adquirido tonalidades ligeramente más metálicas respecto a la fibra activada, mostrada en la Figura 3.8.a). Esta muestra de fibra funcionalizada previamente ha pasado por los baños de acetona e NaOH.

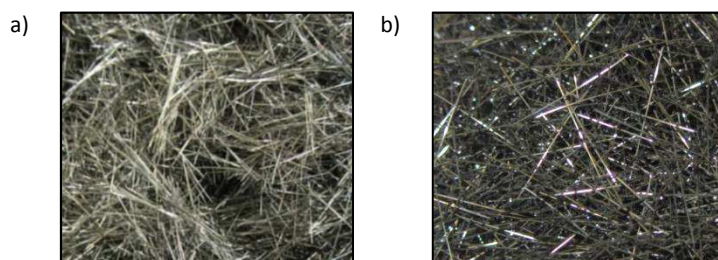


Figura 3.8 Fibra de acero: a) Fibra activada, b) Fibra funcionalizada

Cabe señalar que a simple vista es muy difícil diferenciar las fibras activadas de las fibras funcionalizadas y además, no se pueden distinguir las fibras funcionalizadas con una concentración de TEOS de 0,1% de las fibras funcionalizadas con una concentración de 1% o 10%. Así pues, al trabajar con tantas muestras que no son diferenciables a simple vista, se ha de ser extremadamente organizado.

Por último, para resumir todos los pasos de la funcionalización de las fibras, la Figura 3.9 agrupa dichos pasos presentándolos en forma de esquema. Este esquema pretende resumir todo lo explicado anteriormente referente al proceso de funcionalización de forma clara.

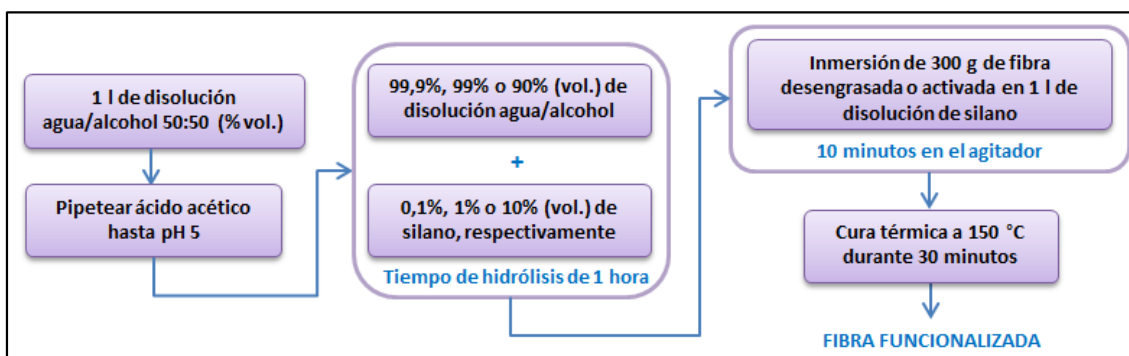


Figura 3.9 Funcionalización de las fibras

3.3.1.4 Baño de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

En esta etapa se tratan tanto fibras procedentes de las tres etapas anteriores del tratamiento como fibra sin tratar. Así pues, se pesan 300 gramos de fibra sin tratar, 300 gramos de fibra desengrasada y 300 gramos de fibra activada. Además, se pesan 300 gramos de fibra funcionalizada que previamente solo ha pasado por la etapa de desengrase y 300 gramos de fibra funcionalizada que ha pasado por la etapa de desengrase y también por la etapa de inmersión en NaOH, de cada una de las tres concentraciones de TEOS realizadas. Así pues, en esta etapa se han de tratar unos 2,7 kg de fibra en total.

Una vez pesada la fibra, se procede a la preparación de las disoluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 0,1 molar. Como cada litro de disolución solo sirve para tratar 300 gramos de fibra, se han de preparar 9 litros para tratar los 2,7 kg de fibra. Sin embargo, debido a una limitación de recipientes, solo se pueden preparar 2 litros de disolución por vez. Así pues, se preparan 2 litros sabiendo que se necesitan 7,40 gramos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por cada litro de disolución. El orden seguido en la preparación de la disolución consiste en poner 14,80 gramos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en un vaso de precipitado, añadir agua destilada hasta la marca de los 2000 ml y mezclar el contenido con una varilla de vidrio. El hidróxido de calcio utilizado es de la marca Sharlau en formato polvo. La Figura 3.10 muestra el aspecto del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pesado en la balanza analítica cuya precisión, que ya se ha comentado anteriormente, es de 0,1 mg.

A continuación, se llenan 2 recipientes con 1 litro de disolución cada uno de ellos, se ponen 300 gramos de fibra, se tapan y se introducen en el agitador durante 30 minutos a una velocidad de 10 rpm, colocando uno a cada lado del aparato para compensar el peso. Es

importante comentar que la disolución se ha de agitar antes de rellenar los recipientes para recuperar el hidróxido de calcio que se haya podido depositar en el fondo del vaso.



Figura 3. 10 Preparación de la disolución: Ca(OH)_2 en polvo

Transcurrido el tiempo de agitación, se retira la fibra de la disolución y se lava con agua destilada para eliminar el exceso de Ca(OH)_2 . Para ello, la disolución se decanta, los recipientes se rellenan con agua destilada, se tapan, se agitan suavemente y después de unos minutos, otra vez se decanta guardando los residuos para su posterior recogida y tratamiento. Al final, la fibra se pone en unas bandejas estando mojada y por ello, para secarla, se introduce en la estufa durante unas 12 horas a $50\text{ }^\circ\text{C}$. Pasado el tiempo de secado, la fibra tratada se extrae de la estufa y se guarda para su posterior utilización en la fabricación de HUARRF. Por último, se repite todo el proceso con el resto de fibra que necesita ser tratada con Ca(OH)_2 .

La Figura 3.11.b) muestra fibra funcionalizada con una concentración de TEOS de 1%, previamente bañada en acetona e NaOH y posteriormente en Ca(OH)_2 , es decir, muestra fibra que ha pasado por las 4 etapas del tratamiento. Comparando ambas imágenes de la Figura 3.11, se observa que la muestra de fibra tratada con Ca(OH)_2 presenta una leve tonalidad blanquecina en comparación con la fibra funcionalizada.

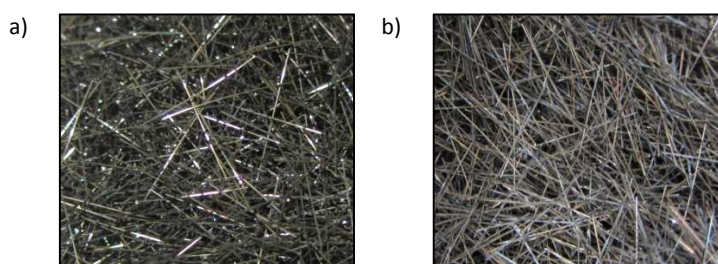


Figura 3.11 Fibra de acero: a) Fibra funcionalizada, b) Fibra funcionalizada procedente del baño en Ca(OH)_2

Como se puede observar, a simple vista es difícil diferenciar las fibras funcionalizadas de las fibras tratadas con Ca(OH)_2 . Además, como se ha comentado anteriormente, distinguir las fibras activadas de las fibras funcionalizadas también es complicado y diferenciar las fibras funcionalizadas con diferentes concentraciones de TEOS entre sí es una tarea imposible. Así pues, se ha de ser extremadamente organizado al trabajar con tantas muestras que son muy parecidas entre sí. Por ello, se ha usado una nomenclatura que permite una rápida identificación de la fibra, que se recoge en la Tabla 3.3. Dicha nomenclatura, leída de izquierda a derecha, indica la etapa o las etapas del tratamiento a la que se ha sometido la fibra.

Tabla 3.3 Nomenclatura de las fibras en la campaña experimental preliminar

CASO	NOMENCLATURA	EXPLICACIÓN
Caso 1	REF	Fibra sin tratar
Caso 2	REF_A	Fibra sin tratar bañada en acetona
Caso 3	REF_A_N	Fibra sin tratar bañada en acetona e NaOH
Caso 4	REF_C	Fibra sin tratar bañada en Ca(OH) ₂
Caso 5	REF_A_C	Fibra sin tratar bañada en acetona e Ca(OH) ₂
Caso 6	REF_A_N_C	Fibra sin tratar bañada en acetona, NaOH e Ca(OH) ₂
Caso 7	T_0,1%_A	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 0,1% y previamente bañada en acetona
Caso 8	T_0,1%_A_N	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 0,1% y previamente bañada en acetona e NaOH
Caso 9	T_0,1%_A_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 0,1%, bañada en Ca(OH) ₂ y previamente en acetona
Caso 10	T_0,1%_A_N_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 0,1%, bañada en Ca(OH) ₂ y previamente en acetona e NaOH
Caso 11	T_1%_A	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 1% y previamente bañada en acetona
Caso 12	T_1%_A_N	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 1% y previamente bañada en acetona e NaOH
Caso 13	T_1%_A_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 1%, bañada en Ca(OH) ₂ y previamente en acetona
Caso 14	T_1%_A_N_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 1%, bañada en Ca(OH) ₂ y previamente en acetona e NaOH
Caso 15	T_10%_A	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 10% y previamente bañada en acetona
Caso 16	T_10%_A_N	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 10% y previamente bañada en acetona e NaOH
Caso 17	T_10%_A_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 10%, bañada en Ca(OH) ₂ y previamente en acetona
Caso 18	T_10%_A_N_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 10%, bañada en Ca(OH) ₂ y previamente en acetona e NaOH

La nomenclatura asociada a los casos de la Tabla 3.3 informa que se trata de fibra sin tratar (REF), fibra a la que se le ha realizado el baño de desengrase (A), fibra a la que se le ha realizado el baño de NaOH (N), fibra a la que se le ha realizado el baño de Ca(OH)₂ (C) y/o fibra funcionalizada con una concentración de TEOS de 0,1%, 1% o 10% (T_0,1%, T_1% y T_10%).

3.3.2 Ensayos de las fibras

Una vez tratadas las fibras, se pretende comprobar la efectividad de cada una de las etapas del tratamiento antes de utilizarlas como refuerzo en la fabricación de hormigones. De hecho, se quiere verificar si la superficie de la fibra se ha visto modificada tanto física como químicamente. Por un lado, se quiere confirmar si las fibras presentan más rugosidad ya que mejoraría la adherencia física de la fibra con la matriz. Para ello, se coge fibra de los 18 casos estudiados que se recogen en la Tabla 3.3 y se les realiza microscopía óptica y además, se calcula el ángulo de contacto que se obtiene al introducir una fibra en una gota con pH básico. Por otro lado, se quiere constatar si hay modificación química de la superficie ya que también mejoraría la adhesión de la fibra a la pasta cementicia de ultra-alta resistencia. Para ello, se coge fibra de un par de los casos estudiados y se someten a microscopía electrónica de barrido.

3.3.2.1 Microscopia óptica

Varias fibras de cada uno de los casos estudiados son analizadas con el microscopio para observar si sus superficies han sufrido algún cambio respecto a la superficie de la fibra sin tratar. De hecho, la finalidad de usar microscopia óptica con las fibras que han sido tratadas es ver si sus superficies presentan rugosidades tomando como referencia la superficie de la fibra sin tratar.

Para realizar este análisis visual, se utiliza un microscopio óptico trinocular que se trata de un microscopio óptico que posee tres tubos de observación; uno para cada ojo más el tubo para conectar una cámara digital. A su vez, se conecta a un ordenador para poder ver las imágenes que produce el microscopio y guardarlas en un disco duro. A grandes rasgos, es un instrumento que tiene cuatro lentes de objetivo y que se utiliza para poder aumentar las imágenes de objetos no visibles a simple vista, como es el caso de la superficie de la fibra utilizada.

La Figura 3.12 muestra dos imágenes tomadas con el microscopio para observar si hay presencia de sustancias depositadas sobre las superficies de las fibras tratadas, lo que aumentaría la rugosidad de las fibras mejorando la adherencia física de la fibra con la matriz. La figura de la izquierda es de fibra de referencia, es decir, fibra sin tratar (caso 1) y la figura de la derecha es de fibra funcionalizada con TEOS con una concentración de 10% que previamente ha pasado por los baños de acetona e NaOH y después de la funcionalización, por el baño de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (caso 18). Cabe señalar que estas imágenes y/u otras semejantes, se analizarán posteriormente en el *Capítulo IV: Resultados y análisis de la campaña experimental preliminar*.

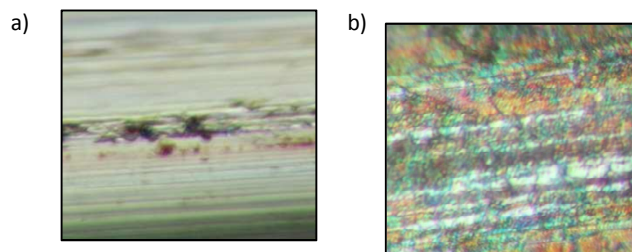


Figura 3.12 Microscopia óptica: a) Fibra sin tratar, b) Fibra funcionalizada procedente del baño en $\text{Ca}(\text{OH})_2$

3.3.2.2 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto se define como el ángulo que forma una gota al entrar en contacto con una superficie. El valor de dicho ángulo indica el grado de mojabilidad y por tanto, el grado de adhesión de la gota sobre la superficie. Si la superficie es hidrófuga, es decir, que repele el agua, el ángulo de contacto es igual o superior a 90° y por tanto, la gota no moja a la superficie y no genera adhesión entre ambos materiales. Si la superficie es hidrófila, es decir, que tiene afinidad por el agua, el ángulo de contacto es inferior a 90° y la gota moja a la superficie generando adhesión entre ambos materiales.

Para medir el ángulo de contacto, se usan aparatos como el goniómetro o el tensiómetro así como ordenadores con software específicos. Sin embargo, la medición de dicho ángulo para

calcular la adhesión conlleva cierta controversia ya que es un sistema que depende de varios factores y no se puede reproducir fácilmente en todas las situaciones. De hecho, en función del líquido usado y de la rugosidad de la superficie, el ángulo de contacto puede variar enormemente. Así pues, estas limitaciones y la falta de reproductibilidad, hacen que esta medición aporte información adicional sobre el grado de adhesión pero no permite asegurar con certeza la correcta adhesión en una unión.

Con la realización de este ensayo se quiere comprobar si las fibras de acero están revestidas después de haber pasado por las etapas del tratamiento ya que las fibras funcionalizadas con TEOS deberían presentar un comportamiento hidrófilo, según la bibliografía consultada (Minet J. *et al.*, 2006). Así pues, la gota debería subir más por las fibras funcionalizadas con TEOS que por las fibras sin tratar, presentando un ángulo de contacto menor.

Para determinar el ángulo que se obtiene al introducir una fibra en una gota, el ensayo del ángulo de contacto se adapta de la siguiente manera: en primer lugar, se clava la fibra que se quiere estudiar en un trozo de porexpan y éste se pega en la parte superior de una prensa. En segundo lugar, se coloca una gota de una disolución previamente preparada sobre una superficie hidrófuga y se baja la prensa hasta introducir la fibra en la gota. Por último, se va subiendo la prensa poco a poco y mediante una cámara conectada a un ordenador, se van tomando imágenes de los ángulos que se forman mientras la fibra va saliendo de la gota. Posteriormente, se calculan dichos ángulos con la ayuda del programa Autocad, tal y como muestra la Figura 3.13. El ángulo de contacto será la media de los dos ángulos que se forman a cada lado de la fibra. Cabe señalar que este ensayo se realiza a cada uno de los 18 casos estudiados y que la disolución que se prepara tiene un pH básico de 12,5 para simular el medio alcalino del hormigón.

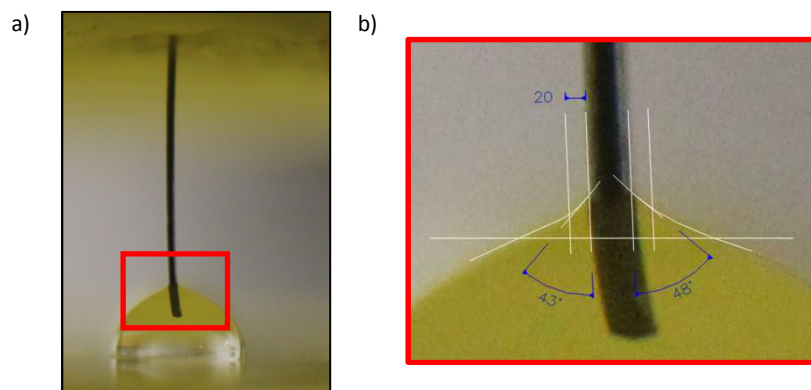


Figura 3.13 Ángulo de contacto: a) Imagen del ángulo, b) Cálculo del ángulo

3.3.2.3 Microscopia electrónica de barrido

Como ya se ha comentado, el ensayo de microscopia óptica se realiza para comprobar si las superficies de las fibras tratadas presentan más rugosidad que la superficie de la fibra sin tratar ya que este hecho, mejoraría la adherencia física de la fibra con la matriz. Por otro lado, el ensayo de ángulo de contacto se realiza para determinar si las superficies de las fibras están revestidas con TEOS, con lo que se demostraría la efectividad de la funcionalización. Sin embargo, para verificar si las superficies de las fibras tratadas presentan una modificación química respecto a la superficie de la fibra sin tratar, es necesario realizar otro tipo de ensayo.

Dicho ensayo es microscopía electrónica de barrido (SEM), que utiliza electrones para crear una imagen de alta resolución. El equipo está formado por un dispositivo que genera un haz de electrones que ilumina la muestra y por diferentes detectores que se encargan de recoger los electrones generados de la interacción con la superficie de la muestra. El resultado es una imagen que refleja las características superficiales de dicha muestra y proporciona información de la forma, de la textura y de la composición química de los materiales que la componen (Piqueras J., Faura M., 1994).

Para realizar este ensayo, se llevan las muestras que se quieren analizar a un laboratorio externo. Cabe mencionar que debido al elevado coste económico que supone el análisis de cada muestra, se ha de escoger muy bien qué fibras analizar. Así pues, para comprobar si el tratamiento funciona y las fibras están recubiertas y además, estudiar cómo influye la concentración de TEOS en la capa de revestimiento de la fibra, se decide analizar unas muestras de los casos 8, 12, 16 y 18. Los muestras de los casos 8, 12 y 16 corresponden a fibra funcionalizada con TEOS con una concentración de 0,1%, 1% y 10%, respectivamente, que ha pasado por el baño de acetona e NaOH. La muestra del caso 18 corresponde a fibra funcionalizada con una concentración de 10% que ha pasado tanto por los baños previos de acetona e NaOH como por el baño posterior de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La Figura 3.14 recoge una imagen de la superficie de la fibra del caso 18 y la composición química de un determinado punto de la superficie. Dichas imágenes y/u otras semejantes, se analizarán posteriormente en el *Capítulo IV: Resultados y análisis de la campaña experimental preliminar*.

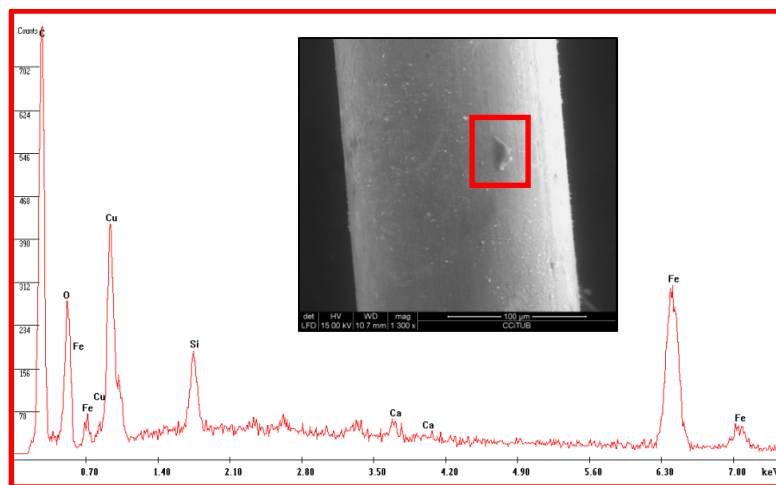


Figura 3.14 Imagen SEM de la muestra de fibra funcionalizada y baño de $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Vista general y composición química

3.3.3 Proceso de fabricación del hormigón

En este apartado se definen los materiales y la dosificación del hormigón que se fabricará. Asimismo, se describe el procedimiento a seguir para fabricar el hormigón y se detallan las dimensiones de las probetas y la cantidad de probetas necesarias. El tipo de probeta a fabricar dependerá de los ensayos que se deban realizar.

3.3.3.1 Dosificación

Previamente a la fabricación del hormigón, se establece la dosificación en la que se indica la cantidad de cada material para el amasado. En la realización de esta campaña experimental preliminar se plantea una única dosificación en la cual se emplean fibras de acero que pasan por diferentes etapas del tratamiento. Por tanto, se fabrican 18 hormigones que se diferencian entre ellos en el tratamiento que han recibido las fibras y no en la dosificación utilizada.

En esta primera campaña experimental no se plantea la introducción de diferentes contenidos de fibras. Así, el contenido de fibras de acero añadido a la dosificación de todos los hormigones es de un 2% de fibras en volumen. La dosificación de los hormigones fabricados para la realización de esta campaña se muestra en la Tabla 3.4, donde se indica la cantidad en kg/m^3 de los materiales utilizados para su fabricación. Cabe mencionar que para cada serie de amasado se fabricará 1,5 litros.

Tabla 3.4 Dosificación del HUARRF en la campaña experimental preliminar

HUARRF	MATERIAL (kg/m^3)					
	CEM I 52,5 R	Arena 0/1	Agua	MasterGlenium ACE 425	MasterRoc MS 685	Fibras
	943,82	1145,25	118,37	66,45	67,49	171,32

Como ya se ha comentado, la Tabla 3.4 muestra una única dosificación de HUARRF que se utiliza para fabricar 18 hormigones con fibras de acero que han recibido diferentes tratamientos. Así pues, como lo que diferencia a los hormigones es el tratamiento de las fibras, el código de identificación de cada serie de amasado es el mismo que se utiliza para diferenciar las fibras tratadas, recogido en la Tabla 3.3.

Respecto a la dosificación, se observa que la arena se encuentra en elevada cantidad y además, se utiliza una mezcla líquida basada en nanosílice (MasterRoc MS 685). Esto indica que la matriz del hormigón estará constituida por elementos de mayor finura aportando fluidez en estado fresco. Por otra parte, se observa el gran contenido de fibras que caracteriza a los HUARRF. Asimismo, para mejorar su trabajabilidad, se incorpora un aditivo superplastificante que también mejora la fluidez del material (MasterGlenium ACE 425). Cabe mencionar que la relación a/c real es de 0,234.

3.3.3.2 Materiales

En el apartado anterior, se ha definido la dosificación utilizada para la fabricación del hormigón. Para profundizar en la composición del hormigón empleado en los ensayos, se considera necesario conocer las características de los materiales que lo componen. Para ello, en este apartado, se describen los productos utilizados en su fabricación. Dichas descripciones permiten conocer la función que cumple cada uno de ellos y además, proporcionan la información básica de los materiales utilizados en la fabricación para la posible reproducción del hormigón por parte de terceros.

- Cemento

Para la fabricación del hormigón se emplea el cemento SUPER-DRAGON, fabricado por Cementos Molins Industrial, S.A. Se trata de un cemento Portland tipo I de categoría resistente

muy alta 52,5 R, diseñado principalmente para la industria del prefabricado de hormigón. Sus características principales son altas resistencias iniciales y finales y endurecimiento rápido, incluso en tiempo frío. Las especificaciones técnicas de este cemento se recogen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Especificaciones técnicas del cemento

CARACTERÍSTICAS	CEM I 52,5 R
Resistencia a compresión (MPa)	≥30 (a 2 días)
	≥52,5 (a 28 días)
Tiempo de fraguado (min)	≥45 (inicio)
	≤720 (final)
Expansión (mm)	≤10
Pérdida por calcinación (%)	≤5,0
Residuo insoluble (%)	≤5,0
Sulfatos (%)	≤4,0
Cloruros (%)	≤0,10

- Arena

El árido empleado durante el proceso de fabricación del hormigón es una arena de 0/1 mm, cuyo nombre comercial es arena ZF-V3040S. La granulometría obtenida para dicha arena se muestra en la Figura 3.15, donde se observa que el árido más grande es de 0,6 mm.

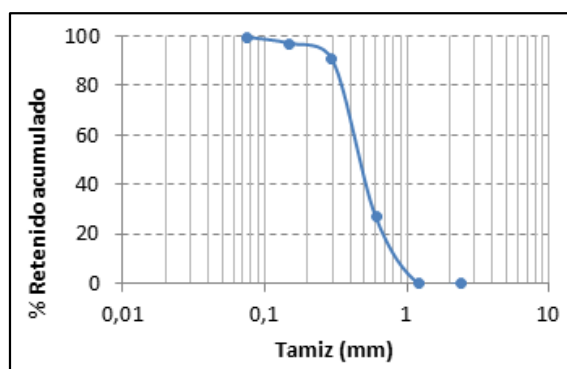


Figura 3.15 Granulometría de la arena

- Aditivo

El aditivo incorporado a la mezcla tiene como objetivo mejorar las prestaciones del hormigón en términos de trabajabilidad y resistencias iniciales. El aditivo utilizado ha sido proporcionado por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L. El aditivo MasterGlenium ACE 425 funciona como superplastificante o reductor de agua de alta actividad. Permite el desarrollo de altas resistencias iniciales del hormigón y su efecto reductor de agua permite disminuir las relaciones a/c sin perder trabajabilidad en el material. La Tabla 3.6 muestra las principales características de dicho aditivo.

Tabla 3.6 Especificaciones técnicas del superplastificante

PROPIEDADES	MasterGlenium ACE 425
Aspecto físico	Líquido amarillento turbio
pH, 20 °C	5,5 ± 1
Densidad, 20 °C	1,048 ± 0,02 g/cm ³
Viscosidad, 20 °C Brookfield Sp00/50 rpm	<100 cps
Contenido en cloruros	<0,1%

- Nanosílice

Se trata de una mezcla líquida basada en una suspensión de nanosílice amorfa cuya finalidad es proporcionar una mejor cohesión, menos porosidad e incrementar la compacidad del material. Esta mezcla ha sido proporcionada por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L.

El precipitado de sílice amorfa MasterRoc MS 685, antes llamado MEYCO MS 685, empieza a reaccionar con carácter puzolánico tan pronto como es incorporado en la mezcla de cemento, proporcionando textura a la pasta. Estas partículas ultrafinas se incorporan en la mezcla con el agua de amasado o al final de la adición de ésta, después de un premezclado, ya que no debe añadirse a la mezcla seca. La Tabla 3.7 muestra las principales características de dicha mezcla de nanosílice.

Tabla 3.7 Especificaciones técnicas de la mezcla de nanosílice

PROPIEDADES	MasterRoc MS 685
Aspecto físico	Líquido blanco
pH, 20 °C	10 ± 1
Densidad, 20 °C	1,134 ± 0,03 g/cm ³
Viscosidad, 20 °C Brookfield Sp00/100 rpm	<30 cps
Contenido en cloruros	<0,1%

- Fibras metálicas

Como ya se ha comentado en el apartado 3.3.4. *Funcionalización de las fibras*, las fibras metálicas utilizadas en la primera etapa del tratamiento, llamadas fibras sin tratar o de referencia, son las Dramix® del tipo OL13/.16. Estas fibras son suministradas por la empresa Bekaert S.A. y sus principales características se recogen en la Tabla 3.1. Sin embargo, de los 18 hormigones que se fabrican, solamente uno de ellos se hace con fibra sin tratar. El resto de los hormigones se fabrican con esta misma fibra pero después de haber pasado por el baño de acetona, de NaOH, la funcionalización con TEOS y/o la inmersión en Ca(OH)₂.

3.3.3.3 Fabricación del hormigón

El hormigón se fabrica en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló. Para la realización del amasado de las materias primas se emplea el siguiente dispositivo experimental:

- Balanza de capacidad de 2,2 kg y una precisión de 0,1 g.
- Amasadora de 2 litros de capacidad (Figura 3.16).
- Cronómetro.
- Mesa de vibrado.
- Mesa de sacudidas.

Con el objetivo de normalizar el proceso de amasado y mantener unos criterios en la fabricación del hormigón, se establece un orden en el proceso. En primer lugar, se pesan las proporciones de los materiales (cemento, arena, agua, aditivo, nanosílice y fibras). En segundo lugar, se introducen los materiales sólidos (arena y cemento) en el recipiente y se amasa durante 1 minuto a velocidad lenta. Transcurrido el tiempo, se introduce el aditivo, la

nanosílice y el agua y se amasa durante 5 minutos también a velocidad lenta. Después, se continúan mezclando los materiales durante otros 5 minutos a velocidad rápida. Transcurridos estos minutos, se añade la fibra poco a poco para evitar la formación de erizos y se amasa durante 10 minutos más, los primeros 5 minutos a velocidad lenta y los últimos 5 minutos a velocidad rápida.



Figura 3. 16 Amasadora de 2l de capacidad

Para determinar la consistencia del hormigón fabricado, se realiza un ensayo para determinar dicha consistencia por medio de la mesa de sacudidas. Este ensayo se desarrolla cuando el hormigón se encuentra en estado fresco, justo después de amasar la mezcla. Para la realización del ensayo, es necesario seguir el procedimiento siguiente: se rellena con hormigón un molde troncocónico que está situado en una mesa circular de sacudidas, se enrasa la superficie, se quita el molde y se somete el hormigón a 25 sacudidas verticales. Por último, se mide el diámetro medio que alcanza el hormigón fresco. Cabe mencionar que los hormigones fabricados en la campaña experimental se han diseñado para obtener una consistencia fluida, entre 200 mm y 250 mm de diámetro (NPCA, 2013). La Figura 3.17 muestra el diámetro medio que ha alcanzado el hormigón después de las sacudidas.

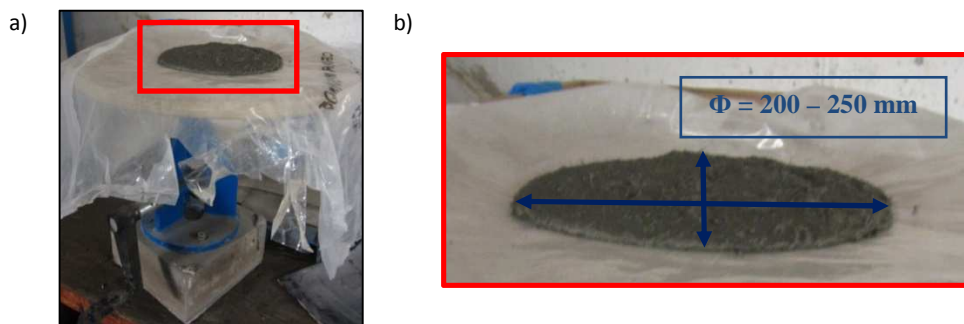


Figura 3.17 Ensayo de consistencia: a) Mesa de sacudidas, b) Diámetro medio

Para el llenado de las probetas, se sigue el procedimiento siguiente: en primer lugar, los moldes de las probetas se deben pintar con aceite para que cuando se desmolden sea más fácil y el hormigón no quede adherido en ellos. A continuación, se distribuyen todos los moldes en serie, se rellenan hasta la mitad y se realiza la compactación mediante la mesa de vibrado. Utilizando dicha mesa, se reduce la porosidad y los huecos en el hormigón. Además, se emplea la mesa de vibrado ya que al tratarse de un hormigón reforzado con fibras, la compactación manual mediante el uso de la barra metálica es dificultosa. Una vez todos los moldes son compactados por la mitad de su capacidad, se terminan de llenar y se vibran de nuevo. Cabe

mencionar que se fabrican 5 probetas para cada una de las 18 series, necesitándose 2 moldes para cada serie ya que en cada molde solo se pueden fabricar 3 probetas.

Cuando las probetas ya se encuentran compactadas, se procede a enrasarlas para conseguir que la cara de la probeta quede lisa y se elimina la cantidad de material residual que queda en ellas. Se debe enrasar correctamente para obtener la cara de la probeta lo más lisa posible ya que será importante para los ensayos que se realizarán posteriormente. Por último, se protegen las probetas con un plástico para evitar la evaporación del agua. Transcurridas 24 horas, las probetas son desmoldadas e introducidas en la cámara húmeda hasta ser ensayadas, según la edad programada para los ensayos que en esta campaña experimental son 28 días. La Figura 3.18 muestra la cámara húmeda donde las probetas son guardadas hasta sus ensayos.



Figura 3.18 Probetas en la cámara húmeda

Cabe mencionar que después de desmoldar las probetas, se procede a su marcaje escribiendo el código de identificación que se compone de la nomenclatura de las fibras que se han adicionado, recogidas en la Tabla 3.3, y de la fecha de fabricación. Para facilitar la lectura de este apartado y resumir las series de hormigón fabricadas, la Tabla 3.8 recoge dichas series correctamente identificadas y además, la fecha en que las probetas se han de ensayar.

Tabla 3.8 Nomenclatura y fecha de ensayo del hormigón fabricado en la campaña experimental preliminar

SERIE	NOMENCLATURA	FECHA DE ENSAYO (a 28 días)
1	REF 07/10/15	04/11/15
2	REF_A 07/10/15	04/11/15
3	REF_A_N 08/10/15	05/11/15
4	REF_C 07/10/15	04/11/15
5	REF_A_C 07/10/15	04/11/15
6	REF_A_N_C 07/10/15	04/11/15
7	T_0,1%_A 13/10/15	10/11/15
8	T_0,1%_A_N 08/10/15	05/11/15
9	T_0,1%_A_C 14/10/15	11/11/15
10	T_0,1%_A_N_C 09/10/15	06/11/15
11	T_1%_A 13/10/15	10/11/15
12	T_1%_A_N 07/10/15	04/11/15
13	T_1%_A_C 14/10/15	11/11/15
14	T_1%_A_N_C 09/10/15	06/11/15
15	T_10%_A 13/10/15	10/11/15
16	T_10%_A_N 08/10/15	05/11/15
17	T_10%_A_C 14/10/15	11/11/15
18	T_10%_A_N_C 09/10/15	06/11/15

3.3.3.4 Descripción de las probetas

En esta campaña experimental solamente se utilizan probetas prismáticas cuya geometría es de 40x40x160 mm. Estas dimensiones responden a las requeridas para determinar las resistencias mecánicas a compresión y a flexión de morteros de cemento, según la norma EN 196-1:2005. Cabe recordar que se fabricarán 5 probetas de cada tipo de hormigón.

3.3.4 Ensayos del hormigón

En el presente apartado se describen los distintos ensayos realizados al hormigón endurecido para realizar su caracterización mecánica así como al hormigón fresco para estudiar la velocidad de evolución del calor generado durante la hidratación. Como ya se ha comentado, el objetivo principal de esta campaña es acotar las variables del tratamiento previo de las fibras. Por tanto, conociendo las series que presentan mejor resistencia a flexión y a compresión, se puede saber la etapa o las etapas del tratamiento que dan mejores resultados. Esto es posible ya que las fibras adicionadas en cada serie son diferentes al del resto de las series al no haber pasado todas las fibras por las mismas etapas del tratamiento. Así pues, en esta campaña principalmente interesa conocer la carga máxima que la probeta es capaz de soportar hasta su rotura para descartar las series que den peores resultados. Por otro lado, la realización de calorimetría a muestras pequeñas de todos los hormigones fabricados permite descartar aquellos que presenten un endurecimiento muy tardío.

3.3.4.1 Ensayo de flexión

Este ensayo no sigue la UNE-EN 14651:2007+A1 cuyo objetivo es determinar la resistencia a flexotracción del hormigón reforzado con fibras, estudiando la resistencia residual que se da tras la aparición de la primera fisura. El ensayo a flexotracción siguiendo la norma anterior permite conocer el ancho de la fisura a medida que transcurre el ensayo. Sin embargo, en esta campaña preliminar dicha información pasa a un segundo plano ya que solamente con conocer la carga máxima es suficiente para descartar aquellas series que presenten peores resistencias.

Por tanto, para realizar el ensayo de resistencia a flexión a 28 días se decide seguir la norma EN 196-1:2005. La resistencia a flexión se determina aplicando una carga en tres puntos de la probeta hasta su rotura. Las probetas se ensayan a flexotracción en la prensa IBERTEST, controlada por un ordenador. Cada probeta se coloca en el equipo de ensayo con la cara de hormigonado orientada hacia un lateral y se aplica una carga centrada sobre una cara lisa a una velocidad de 0,05 kN/s a través de un rodillo de carga, tal y como se muestra en la Figura 3.19.a). Cabe señalar que la distancia entre los ejes de los rodillos de apoyo es $l = 100$ mm, el ancho de la probeta es $b = 40$ mm y el grosor de ésta es $d = 40$ mm.

3.3.4.2 Ensayo de compresión

Para evaluar la resistencia a compresión del hormigón fabricado, se realiza el ensayo de las probetas a la edad de 28 días también según la norma EN 196-1:2005. La resistencia a compresión se determina en cada una de las dos mitades de la probeta que resultan del ensayo de la resistencia a flexión.

La realización del ensayo consiste en aplicar una carga a las probetas de forma que éstas son comprimidas hasta que se produce su rotura. Así pues, utilizando la prensa IBERTEST, se coloca la probeta con la cara de hormigonado orientada hacia un lateral y se aplica una carga uniaxial sobre una cara lisa a una velocidad de 2,40 kN/s hasta la rotura. Cabe mencionar que la máquina está formada por dos platos de acero con las caras planas cuyo grueso debe garantizar la indeformabilidad de éstos durante la realización del ensayo. Además, como el equipo se configura para que una vez alcanzada la carga máxima de la probeta se detenga el ensayo, los valores obtenidos son básicamente los de carga máxima. La Figura 3.19.b) muestra la realización del ensayo.

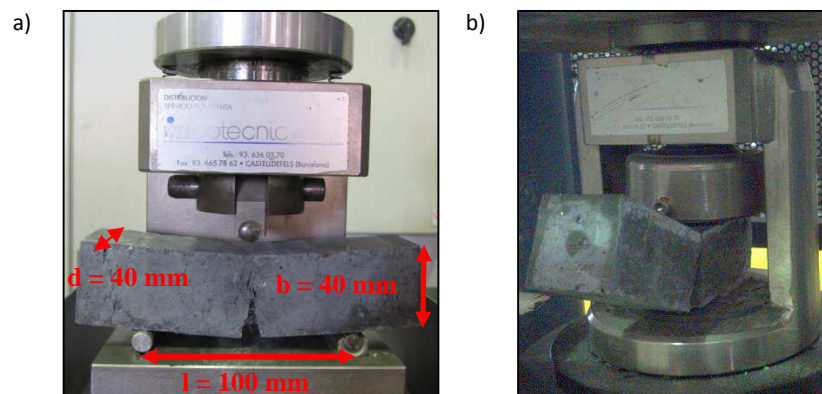


Figura 3.19 Ensayos del hormigón: a) Ensayo de flexión, b) Ensayo de compresión

3.3.4.3 Calorimetría

Como ya se ha comentado, la calorimetría es un ensayo gracias al cual se determina la velocidad de evolución del calor generado durante la hidratación del hormigón en función del tiempo. En este trabajo el calor de hidratación se ensaya en una cámara adiabática que no permite el intercambio de calor con el medio y que se encuentra conectada a un ordenador, el cual monitorea la evolución del calor. Dicha cámara, que tiene una capacidad para 4 muestras, se presenta en la Figura 3.20.a) y en la figura de la derecha, se observa una muestra que ya ha sido ensayada.

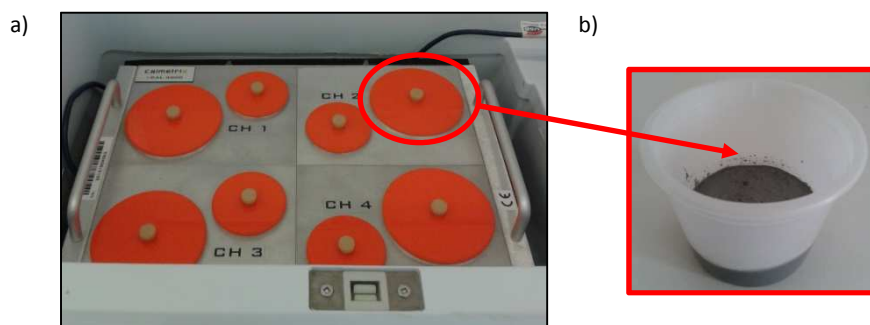


Figura 3.20 Calorimetría: a) Cámara adiabática abierta, b) Muestra ensayada

El procedimiento seguido para realizar la calorimetría de los 18 hormigones fabricados es el siguiente: utilizando la misma dosificación que en la fabricación de los hormigones, se preparan muestras pequeñas, de unos 50 gramos, de cada una de las series fabricadas. En primer lugar, se pesa el recipiente vacío que se introducirá en la cámara, se reserva hasta su posterior utilización y se pesan las proporciones de los materiales. A continuación, en otro

recipiente se mezclan los materiales sólidos (arena y cemento) y después, se añaden los líquidos (aditivo, nanosílice y agua). Se mezcla la muestra hasta conseguir una consistencia bastante fluida y poco a poco, se comienza a agregar la fibra.

Una vez mezclados todos los materiales, se pone la mezcla en el recipiente reservado para la cámara, que previamente se ha pesado, se vibra, se introduce en la cámara y se comienza el ensayo, el cual se programa para 72 horas. Transcurrido el tiempo, se sacan las 4 muestras, que son de hormigones diferentes, y se pesan. Cabe mencionar que el amasado de estas muestras es dificultoso ya que al tratarse de muestras muy pequeñas se ha de hacer manualmente y además, al tener una relación a/c de 0,234 presentan un endurecimiento muy rápido.

3.4 Campaña experimental específica

Una vez analizados los resultados de la campaña preliminar, que se encuentran en el *Capítulo IV: Resultados y análisis de la campaña experimental preliminar*, se procede a fabricar a gran escala aquellos hormigones que hayan presentado mejores resistencias mecánicas. En esta nueva campaña experimental, se perfecciona el tratamiento de las fibras acotando aún más las variables que intervienen en cada etapa y se modifica la dosificación de los hormigones pensando en mejorar su consistencia. Además, se realizan nuevos ensayos queriendo completar la caracterización mecánica del hormigón endurecido.

Así pues, en este apartado se describen aquellas partes de la funcionalización de las fibras, del proceso de fabricación del hormigón y de los ensayos de caracterización realizados que se han visto modificadas de una u otra forma respecto a la campaña experimental preliminar.

3.4.1 Funcionalización de las fibras

Como ya se ha comentado a lo largo del presente capítulo, el tratamiento a partir del cual se pretende modificar la superficie de las fibras para incrementar la adhesión con la matriz, reduciendo la zona de transición fibra-matriz, se divide en cuatro etapas. En esta campaña experimental, dichas etapas son las mismas que en la campaña anterior. Aun así, en este apartado se resumen los procedimientos seguidos en cada etapa haciendo hincapié en las variables que han sido modificadas respecto a la campaña experimental anterior.

En primer lugar, las fibras se introducen en un baño de acetona para desengrasarlas y así, eliminar los residuos orgánicos que se hayan podido adherir a la superficie de la fibra durante su etapa de fabricación. El procedimiento seguido para realizar el ensayo consiste en preparar una disolución de acetona con una concentración de 25% en volumen, llenar los recipientes con 1 litro de disolución cada uno de ellos y 300 gramos de fibra sin tratar e introducirlos en un agitador durante 5 minutos. Transcurrido el tiempo de agitación, se decantan las disoluciones, se coloca la fibra en unas bandejas y se introducen en una estufa durante 12 horas a 100 °C para eliminar el exceso de agua. Pasado el tiempo de secado, la fibra desengrasada se extrae de la estufa y se guarda para la siguiente etapa del tratamiento.

Cabe mencionar que cada litro de disolución solamente desengrasa 300 gramos de fibra sin tratar. Así pues, como se necesitan unos 11 kg de fibra sin tratar para posteriormente

funcionalizarla, se han de preparar unos 37 litros de disolución. Por otro lado, como solamente se disponen de 5 recipientes para poder llevar a cabo la agitación, el procedimiento seguido se tendrá que realizar unas 8 veces para poder desengrasar los 11 kg de fibra.

En segundo lugar, las fibras desengrasadas son sumergidas en un baño de NaOH ya que las disoluciones básicas son una buena opción para activar la superficie de la fibra propiciando la efectividad del posterior revestimiento con silano. De hecho, gracias al ataque químico de la disolución de NaOH, la superficie de la fibra tendrá más OH^- libres para reaccionar con los OH^- del silano. En esta etapa, el procedimiento seguido para realizar la inmersión en NaOH consiste en preparar una disolución de NaOH de concentración de 2,5% en masa, llenar los recipientes con 1 litro de disolución y 300 gramos de fibra desengrasada cada uno de ellos e introducirlos en el agitador durante 10 minutos. Una vez pasado el tiempo de agitación, se lava la fibra y se introduce en la estufa durante 12 horas a 100 °C para secarla. Transcurrido el tiempo de secado, la fibra activada se guarda para posteriormente funcionalizarla.

En esta etapa, cada litro de disolución también se utiliza solamente para limpiar 300 gramos de fibra desengrasada. Por tanto, para limpiar los 11 kg de fibra desengrasada, igualmente que en la etapa anterior, se necesitan unos 37 litros de disolución. En este caso, al disponer solamente de 4 recipientes para realizar la agitación, el procedimiento seguido se ha de hacer unas 10 veces.

En tercer lugar, una vez realizada la activación alcalina de la superficie de las fibras, se procede a funcionalizarla a temperatura ambiente con silano de tipo TEOS. En esta etapa es donde se realiza una modificación del tratamiento de las fibras después de haber analizado los resultados de la campaña experimental preliminar. Este cambio se refleja en las concentraciones de silano ya que se realizan disoluciones con concentraciones de TEOS de 0,1%, 0,5% y 1%, sustituyendo la disolución con concentración de 10% de la campaña anterior por 0,5% en la campaña actual. La razón de ser de esta modificación se explicará en el *Capítulo IV: Resultados y análisis de la campaña experimental preliminar*.

El procedimiento a seguir para funcionalizar los 11 kg de fibra activada consiste en preparar primeramente las disoluciones de TEOS con concentraciones de 0,1%, 0,5% y 1%. A continuación, se mezclan en un agitador magnético durante 1 hora para que se produzca la hidrólisis, se llenan los recipientes con 1 litro de disolución y 300 gramos de fibra y se introducen en el agitador durante 10 minutos. Transcurrido el tiempo de agitación, se retira la fibra de la solución y se introduce en una estufa durante 30 minutos a 150 °C. Después, la fibra funcionalizada se guarda para la última etapa del tratamiento.

Cabe señalar que de esos 11 kg de fibra activada, 3,6 kg se funcionalizan con la concentración de 0,1%, otros 3,6 kg con la de 0,5% y la cantidad restante de fibras con la concentración de 1%. Por tanto, se preparan 36 litros de disolución, 12 litros de cada tipo de concentración. Por otra parte, debido a una limitación de agitadores magnéticos y de recipientes adecuados para el agitador, cabe señalar que solamente se pueden preparar 4 litros de disolución por vez, teniendo que repetir esta etapa 9 veces.

En cuarto y último lugar, se sumerge toda la fibra funcionalizada en un baño de Ca(OH)_2 siguiendo el procedimiento siguiente: se prepara la disolución de Ca(OH)_2 , se llenan los recipientes con 1 litro de disolución y 300 gramos de fibra funcionalizada y se introducen en el agitador durante 30 minutos. Pasado el tiempo de agitación, se lava la fibra y se introduce en la estufa durante unas 12 horas a 50 °C. Transcurrido el tiempo de secado, la fibra tratada estará lista para ser utilizada en la fabricación de HUARRF.

En esta etapa, como en todas las anteriores, cada litro de disolución solamente se utiliza para limpiar 300 gramos de fibra funcionalizada. Por tanto, para limpiar los 10,8 kg de fibra funcionalizada, se necesitan 36 litros de disolución. Al disponer de 4 recipientes para realizar la agitación, el procedimiento seguido se ha de repetir 9 veces en total.

Cabe señalar que en todo momento se piensa en no dañar al medio ambiente y por ello, todos los residuos generados de las disoluciones preparadas a lo largo del tratamiento se guardan para su posterior recogida y tratamiento. Por otro lado, la Tabla 3.9 muestra la nomenclatura dada a los diferentes tipos de fibras tratadas para facilitar su identificación ya que a simple vista no es posible diferenciarlas.

Tabla 3.9 Nomenclatura de las fibras en la campaña experimental específica

CASO	NOMENCLATURA	EXPLICACIÓN
Caso 1	REF	Fibra sin tratar
Caso 2	T_0,1%_A_N_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 0,1%, bañada en Ca(OH)_2 y previamente en acetona e NaOH
Caso 3	T_0,5%_A_N_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 0,5%, bañada en Ca(OH)_2 y previamente en acetona e NaOH
Caso 4	T_1%_A_N_C	Fibra funcionalizada, concentración de TEOS de 1%, bañada en Ca(OH)_2 y previamente en acetona e NaOH

La nomenclatura asociada a los casos de la Tabla 3.9 informa que se trata de fibra sin tratar (REF) y fibra funcionalizada con una concentración de TEOS de 0,1%, 0,5% o 1% (T_0,1%; T_0,5%; T_1%) que ha pasado previamente por los baños de acetona y de NaOH y posteriormente, por el baño de Ca(OH)_2 .

Así pues, después de explicar el tratamiento de las fibras realizado en la campaña experimental específica, se observa que el cambio más significativo respecto a la campaña preliminar reside en las concentraciones de TEOS. En esta nueva campaña se reduce el rango de las concentraciones para determinar la concentración óptima, pasando de concentraciones de hasta 10% de silano a concentraciones de hasta 1% e incluyendo la de 0,5%. Por otra parte, se reduce el número de casos estudiados de fibras (de 18 casos se pasa a 4, recogidos en la Tabla 3.9) y se aumenta significativamente la cantidad de fibra tratada de cada caso ya que en esta etapa la fabricación de hormigón será a gran escala.

3.4.2 Proceso de fabricación del hormigón

En este apartado se definen los materiales y las dosificaciones de los hormigones que se fabricarán. Además, se describe el procedimiento a seguir para fabricar el hormigón y los tipos

de probetas que se fabricarán dependiendo de los ensayos que se deban realizar, detallando sus dimensiones y la cantidad de probetas necesarias.

3.4.2.1 Dosificación

Antes de fabricar el hormigón, se establecen las dosificaciones en las que se indica la cantidad de cada material para el amasado. En la realización de esta campaña experimental se plantean 3 dosificaciones que se diferencian en el volumen de fibras adicionado. Así pues, en la presente campaña se plantea la introducción de diferentes contenidos de fibras, aspecto que no se tuvo en cuenta en la campaña preliminar.

Los contenidos de fibras de acero añadidos a las dosificaciones son de un 2%, 2,5% y 3% de fibras en volumen para los hormigones fabricados con fibras sin tratar y de un 2% para los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas con diferentes concentraciones de silano. Así pues, para la fabricación del hormigón con fibras sin tratar con un 2% de fibras en volumen y para la fabricación de los hormigones con fibras funcionalizadas se empleará la misma dosificación ya que el contenido de fibras añadido es el mismo. En total, se realizarán 6 hormigones diferentes: 3 con fibras sin tratar variando el contenido de fibra y 3 con fibras funcionalizadas variando la concentración de TEOS.

Las dosificaciones de los hormigones fabricados para la realización de esta campaña se muestran en la Tabla 3.10, donde se indica la cantidad en kg/m^3 de los materiales utilizados para su fabricación. Cabe mencionar que para las series con un 2% de fibras en volumen se fabricarán 22 litros de cada una y para las series con un 2,5% y 3% de fibras en volumen se fabricarán 20 litros de cada una al necesitar ensayar menos probetas. Además, en esta tabla se muestra el código de identificación de cada serie de amasado.

Tabla 3.10 Dosificaciones del HUARRF en la campaña experimental específica

MATERIAL (kg/m^3)	REF_2%	REF_2,5%	REF_3%	T_0,1%_A_N_C	T_0,5%_A_N_C	T_1%_A_N_C
CEM I 52,5 R	939,77	935,90	931,5	939,77	939,77	939,77
Arena 0/1	1140,33	1135,65	1130,30	1140,33	1140,33	1140,33
Betoflow D-CL	103,38	102,95	102,50	103,38	103,38	103,38
Agua	85,81	85,45	85,05	85,81	85,81	85,81
MasterGlenium ACE 425	66,17	65,90	65,60	66,17	66,17	66,17
MasterRoc MS 685	67,20	66,90	66,60	67,20	67,20	67,20
Fibras	155,08	187,20	223,55	155,08	155,08	155,08

Dicho código informa que se trata de fibra sin tratar con diferentes contenidos de fibras adicionadas (REF_2%, REF_2,5% y REF_3%) y fibra funcionalizada con diferentes concentraciones de TEOS (T_0,1%, T_0,5% y T_1%) pero mismo contenido de fibras añadido. De hecho, en el código de identificación de los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas se ha obviado el porcentaje de fibras adicionado al ser siempre de 2%. Cabe mencionar que todas las fibras funcionalizadas han pasado por las inmersiones previas de acetona e NaOH y la inmersión posterior de $Ca(OH)_2$, identificadas con las letras A, N y C, respectivamente.

Respecto a las dosificaciones, los aspectos más llamativos observados es que la arena se encuentra en elevada cantidad y que se utiliza un *filler* calizo (Betoflow D-CL) y una mezcla

líquida basada en nanosílice (MasterRoc MS 685). Así pues, la matriz del hormigón estará constituida por elementos de mayor finura que aportarán fluidez en estado fresco. Por otro lado, se observa el gran contenido de fibras que caracteriza a los HUARRF. Además, para mejorar su trabajabilidad, se incorpora un aditivo superplastificante que también mejora la fluidez del material (MasterGlenium ACE 425). Cabe señalar que en esta nueva campaña experimental la relación a/c real se reduce a 0,2 gracias a la utilización del *filler* calizo.

3.4.2.2 Materiales

Como ya se ha observado en la Tabla 3.10 del apartado anterior, los materiales utilizados prácticamente son los mismos que los de la campaña preliminar recogidos en la Tabla 3.4. De hecho, la única diferencia referente a los materiales dada en esta nueva campaña experimental respecto a la preliminar es el uso de *filler* calizo.

Exceptuando el uso de *filler* calizo, el resto de materiales utilizados son los mismos que los de la campaña experimental preliminar y por ende, sus características serán las mismas. Así pues, se emplea cemento SUPER-DRAGON proporcionado por Cementos Molins Industrial, S.A. Dicho cemento se trata de un cemento Portland tipo I de categoría resistente muy alta 52,5 R que presenta altas resistencias iniciales y finales y endurecimiento rápido. El árido empleado es una arena de 0/1 mm, cuyo nombre comercial es arena ZF-V3040S y cuya granulometría determina que el árido más grande es de 0,6 mm.

Respecto al aditivo incorporado a la mezcla, se trata del MasterGlenium ACE 425 proporcionado por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L. Dicho aditivo permite desarrollar altas resistencias iniciales del hormigón y reducir las relaciones a/c sin perder trabajabilidad en el material. Por otro lado, la nanosílice es un precipitado de sílice amorfa cuyo nombre comercial es MasterRoc MS 685 proporcionado también por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L. Este precipitado reacciona con carácter puzolánico al ser incorporado en la mezcla de cemento, proporcionando textura a la pasta. Por último, las fibras metálicas sin tratar son del tipo OL13/.16 suministradas por la empresa Bekaert S.A., cuyas características principales se recogen en la Tabla 3.1. Cabe mencionar que las características principales del cemento se recogen en la Tabla 3.5, las del aditivo en la Tabla 3.6 y las de la nanosílice en la Tabla 3.7.

A continuación, se describe el *filler* calizo utilizado en la fabricación de los hormigones. Su nombre comercial es Betoflow D-CL proporcionado por la empresa OMYA CLARIANA, S.L. Se trata de un carbonato de calcio en polvo fino que se fabrica a partir de una caliza marmórea de gran pureza química, procesada con equipos de alta tecnología. La Tabla 3.11 recoge las características principales del *filler* utilizado.

La utilización de este *filler* mejora el empaquetamiento en el esqueleto granular del cemento y actúa como núcleo de cristalización para la precipitación de portlandita. Estos efectos simultáneos producen la aceleración de la hidratación de los granos de cemento, particularmente con bajos D_{50} y bajas relaciones a/c. Por ello, en esta nueva campaña experimental se puede fabricar el hormigón con una relación a/c real de 0,2 en vez de la relación a/c de 0,234 utilizada en la campaña preliminar.

Tabla 3.11 Especificaciones técnicas del filler calizo

PROPIEDADES	BETOFLOW D-CL
Aspecto físico	Polvo blanco
pH, concentración de 100 g/l, 20 °C	8,5-9,5
Densidad, 20 °C	2,7 g/cm ³
Contenido CaCO ₃	97,5%
Contenido en cloruros	0,016%
Partículas < 0,063 mm	100%
Diámetro medio de las partículas (D ₅₀)	3,9 μm

3.4.2.3 Fabricación del hormigón

En esta campaña experimental, el hormigón también se fabrica en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló. Sin embargo, al fabricar más cantidad de hormigón en cada amasada, el dispositivo experimental utilizado y los criterios en la fabricación del hormigón, especialmente a cuanto al tiempo de amasado se refiere, varían un poco respecto a los de la campaña preliminar. Para la realización del amasado de las materias primas se emplea el siguiente dispositivo experimental:

- Balanza de capacidad máxima de 60 kg y una precisión de 10-20 g.
- Amasadora de 30 litros de capacidad.
- Cronómetro.
- Mesa de vibrado.
- Mesa de sacudidas.

Para estandarizar el proceso de amasado y mantener unos criterios en la fabricación del hormigón, se establece un orden en el proceso. En primer lugar, se pesan las proporciones de los materiales (cemento, arena, *betoflow*, agua, aditivo, nanosílice y fibras), tal y como se muestra en la Figura 3.21.a). En segundo lugar, se introducen los materiales sólidos (arena, cemento y *betoflow*) en el recipiente y se amasa durante 1 minuto. Transcurrido el tiempo, se introduce el aditivo, la nanosílice y el agua y se amasa durante unos 3 minutos. Después, mientras se continúan mezclando los materiales, se comienza a añadir la fibra poco a poco para evitar la formación de erizos (Figura 3.21.b)). Una vez acabada de añadir toda la fibra, el hormigón ya tiene la consistencia esperada y se puede empezar a llenar las probetas (Figura 3.21.c)). Cabe mencionar que para añadir todas las fibras se tardan unos 16 minutos, siendo el tiempo total de mezclado unos 20 minutos por serie.

Justo después de amasar la mezcla, se determina la consistencia del hormigón fabricado utilizando la mesa de sacudidas. El procedimiento seguido en esta campaña experimental para realizar dicho ensayo es análogo al seguido en la campaña preliminar. Así pues, se coloca el molde sobre la mesa, se rellena con hormigón, se enrasa la superficie, se quita el molde, se realizan 25 sacudidas y se mide el diámetro medio alcanzado. Cabe mencionar que este ensayo se ha de realizar rápido ya que la pasta endurece rápido y dificulta el posterior llenado de las probetas. De hecho, la mejor opción es trabajar dos personas durante la fabricación del hormigón: mientras que una de ellas realiza el ensayo de consistencia, la otra comienza a

llenar las probetas y cuando la primera persona acaba de la mesa de sacudidas, ayuda en el llenado.



Figura 3.21 Fabricación del hormigón: a) Preparación de los materiales, b) Incorporación de las fibras, c) Probetas

Por otra parte, el llenado de las probetas se realiza de forma análoga a la seguida en la campaña preliminar. Una vez llenadas, se compactan, se enrasan y se protegen con un plástico durante 24 horas para evitar la evaporación del agua. Transcurrido el tiempo, se desmoldan, se marcan con el código de identificación y se introducen en la cámara húmeda hasta ser ensayadas.

Cabe mencionar que para cada serie se fabrican 8 probetas para ensayar a flexotracción a la edad de 28 días, 24 probetas para realizar el ensayo de *pull-out* a 3, 7, 28 y 90 días y 6 probetas para realizar el ensayo Barcelona a 28 días. La Tabla 3.12 recoge los códigos de identificación de las 6 series realizadas y además, la fecha en que las probetas se han de ensayar. Cada código está formado por la nomenclatura de la dosificación empleada, recogida en la Tabla 3.10, y la fecha de fabricación de las probetas.

Tabla 3.12 Nomenclatura y fecha de ensayo del hormigón fabricado en la campaña experimental específica

SERIE	NOMENCLATURA	FECHA DE ENSAYO					
		Flexotracción y compresión	Pull-out				Barcelona
			28 días	3 días	7 días	28 días	
1	REF_2% 01/02/16	29/02/16	04/02/16	08/02/16	29/02/16	02/05/16	29/02/16
2	REF_2,5% 10/02/16	09/03/16	-	-	09/03/16	-	09/03/16
3	REF_3% 10/02/16	09/03/16	-	-	09/03/16	-	09/03/16
4	T_0,1%_A_N_C 02/02/16	01/03/16	05/02/16	09/02/16	01/03/16	02/05/16	01/03/16
5	T_0,5%_A_N_C 08/02/16	07/03/16	11/02/16	15/02/16	07/03/16	09/05/16	07/03/16
6	T_1%_A_N_C 08/02/16	07/03/16	11/02/16	15/02/16	07/03/16	09/05/16	07/03/16

3.4.2.4 Descripción de las probetas

En esta campaña experimental se realizan 3 probetas diferentes dependiendo del ensayo de caracterización que se les realizará posteriormente. Las probetas son prismáticas para el ensayo de flexotracción y *pull-out*, aunque de diferentes dimensiones, y cilíndricas para el ensayo Barcelona.

- Probetas prismáticas para el ensayo de flexotracción

Para realizar el ensayo de flexotracción, se requieren probetas prismáticas con un tamaño nominal (altura y anchura) de 150 mm y una longitud de 550 – 700 mm. Estas dimensiones son adecuadas para hormigones que contengan áridos de 32 mm de tamaño máximo y/o fibras metálicas de 60 mm de longitud máxima, según la UNE-EN 14651:2007+A1. Como en este trabajo la longitud de la fibra es de 13 mm y el árido más grueso es de 0,6 mm y además, el HUARRF se emplea en la construcción de secciones esbeltas, se considera que las probetas pueden ser más pequeñas. Así pues, en esta campaña experimental para el ensayo de flexotracción y posteriormente el de compresión, se utilizan probetas prismáticas cuya geometría es de 40x40x160 mm.

Por otro lado, según la bibliografía consultada, se recomienda que la longitud de la fibra sea como mínimo dos veces la dimensión del árido más grueso y como en el presente trabajo también se cumple esta relación, se reafirma la idea de hacer probetas más pequeñas (Chenkui H., Guofan Z., 1995). Así, al fabricar probetas más pequeñas, se necesita menos fibra y la cantidad de ésta que se ha de tratar es menor reduciendo tanto el tiempo de trabajo en el laboratorio como la cantidad de residuos generados. Además, al no tener que manipular probetas pesadas, la preparación y configuración para el ensayo resulta más sencilla.

Cabe mencionar que se fabrican 8 probetas para ensayar a flexotracción de cada una de las 6 series, necesiéndose 3 moldes para cada serie ya que en cada molde solo se pueden fabricar 3 probetas.

- Probetas prismáticas para el ensayo de *pull-out*

Mediante el ensayo de *pull-out*, se caracteriza la interfase fibra-matriz analizando el comportamiento de las fibras cuando éstas están alineadas con la carga de arrancamiento. Para tener fibras alineadas con la carga, antes de llenar las probetas, se coloca en el centro del molde una lámina polimérica donde se insertan fibras que quedan distribuidas longitudinalmente en la dirección de la tensión aplicada (Chan Y.-W., Chu S.-H., 2004). Las dimensiones de esta lámina son 25,4x25,4 mm y la longitud de la probeta unos 78 mm.

Así pues, se decide usar los moldes de las probetas prismáticas de 40x40x160 mm poniendo en el centro un trozo de porexpan de un 1cm de grosor para obtener dos probetas cuyas dimensiones sean 40x40x75 mm. Por tanto, si en cada molde se pueden fabricar 3 probetas de 40x40x160 mm, poniendo el porexpan se obtienen 6 probetas de 40x40x75 mm. En total se fabrican 24 probetas de cada una de las 6 series para realizar el ensayo de *pull-out*, necesiéndose 4 moldes para cada serie. Cabe señalar que la lámina polimérica con las fibras insertadas se coloca en el centro de estas nuevas probetas antes de llenarlas.

- Probetas cilíndricas para el ensayo Barcelona

La geometría de las probetas cilíndricas de hormigón es de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura. Estas dimensiones responden a las requeridas para realizar el ensayo Barcelona, según la norma española UNE-83515. Cabe recordar que se fabrican 6 probetas para realizar el ensayo Barcelona de cada una de las 6 series.

3.4.3 Ensayos del hormigón

En este apartado se describen los ensayos realizados al hormigón endurecido para realizar su caracterización mecánica. Éstos son el ensayo de flexotracción, el ensayo de compresión, el ensayo Barcelona y el ensayo *pull-out*. Asimismo, se describe el ensayo realizado al hormigón fresco para estudiar la velocidad de evolución del calor generado durante la hidratación. Dicho ensayo consiste en la realización de calorimetría a pequeñas muestras de los diferentes hormigones fabricados.

3.4.3.1 Ensayo de flexotracción

Como ya se ha comentado, la caracterización del HRF se realiza normalmente mediante ensayos de flexotracción sobre probetas prismáticas a la edad de 28 días, siguiendo las indicaciones de la normativa UNE-EN14651:2007+A1. La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia a flexotracción del hormigón, estudiando la resistencia residual que se da tras la aparición de la primera fisura. Cabe señalar que este tipo de ensayos presenta una alta dispersión en los resultados obtenidos ya que el resultado depende directamente del número de fibras que cosen la sección fisurada.

Por otro lado, la norma pide que el ensayo se realice sobre probetas de 150x150x600 mm. No obstante, en este trabajo, debido a que se cumplen ciertas relaciones referentes a la longitud de la fibra y al tamaño máximo del árido explicadas anteriormente en el apartado 3.4.2.4 *Descripción de las probetas*, se decide fabricar probetas de 40x40x160 mm.

Durante el ensayo, las probetas se apoyan sobre rodillos separados a una distancia de 133 mm y se aplica la carga en el centro de la probeta. Además, las probetas presentan una entalla de 6,7 mm de profundidad en el centro para controlar el lugar de aparición de la fisura y la abertura de ésta se determina mediante el desplazamiento del pistón de la máquina de ensayo Instron. Cabe señalar que debido a la entalla, la sección más débil se localiza en el centro de la probeta. La zona de la entalla coincide con el punto donde se producirá el momento flector máximo de la carga puntual aplicada, produciéndose la fisuración de la probeta en esta zona.

- Ejecución del ensayo

En primer lugar, se ejecuta la entalla en el centro de cada probeta por un método de aserrado por vía húmeda. La entalla se debe realizar en una de las caras adyacentes a la cara de hormigonado para que durante el ensayo, la probeta esté apoyada sobre la cara entallada, la carga se aplique sobre una cara lisa y la cara de hormigonado esté orientada hacia un lateral. Cabe mencionar que la normativa establece una anchura de la entalla inferior o igual a 5 mm y un canto útil (h_{sp}) tras la realización del corte de 125 ± 1 mm, cuando la geometría de la probeta es de 150x150x600 mm. En este trabajo, al ensayar probetas de 40x40x160 mm, se ha

de determinar el canto útil haciendo una relación entre las dimensiones de ambas probetas. Dicho canto útil será de 33,3 mm siendo la profundidad de la entalla de 6,7 mm.

Una vez realizadas las entallas, se mide el canto útil y la anchura de la probeta ya que estas dimensiones permiten el cálculo posterior de los parámetros indicativos de las resistencias residuales del material. Para medir la abertura de fisura, se debería instalar un dispositivo transductor de desplazamiento pero en el momento de realizar los ensayos, éste estaba averiado. Por ello, la abertura de fisura se mide mediante el desplazamiento del pistón de la máquina. Por último, la probeta se coloca en el equipo de ensayo con la cara de hormigonado orientada hacia un lateral y la entalla alineada con el rodillo de carga. La Figura 3.22 muestra un esquema de la configuración del ensayo y una fotografía de una probeta colocada en el equipo.

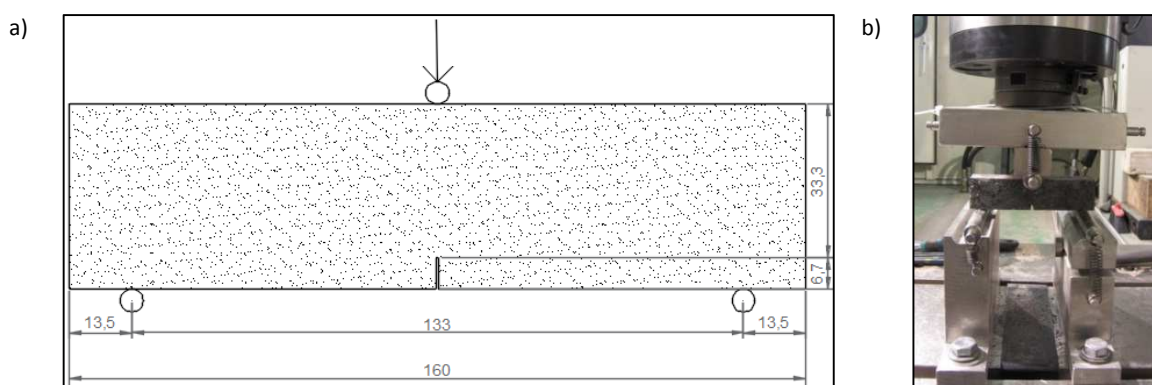


Figura 3.22 Ensayo de flexotracción: a) Esquema de configuración (cotas en mm), b) Probeta en el equipo

El equipo para la realización del ensayo controla la aplicación de la carga a través de la velocidad de desplazamiento del pistón. Así pues, la máquina se configura de modo que el pistón aumente a una velocidad constante de 0,0425 mm/min hasta los 0,125 mm. Alcanzado este punto, la máquina se configura a una velocidad de 0,17 mm/min hasta los 5 mm. Cabe mencionar que en la normativa las velocidades de crecimiento se establecen para el dispositivo transductor de desplazamiento, siendo 0,05 mm/min hasta los 0,1 mm y 0,2 mm/min hasta como mínimo 4 mm. Al no disponer de transductor, en este trabajo se han adaptado dichas velocidades.

Como ya se ha comentado, los rodillos inferiores de apoyo están separados a una distancia de 133 mm y el rodillo superior se sitúa en el centro de luz. La probeta se coloca de modo que la cara de hormigonado quede orientada hacia un lateral y así, las caras que reposan sobre los rodillos son completamente lisas ya que han estado en contacto con el molde de fabricación de la probeta. Una vez alcanzada una abertura de fisura de unos 5 mm, el ensayo de la probeta finaliza. La Figura 3.23 muestra una probeta ensayada cuya fisura aparece en la entalla.

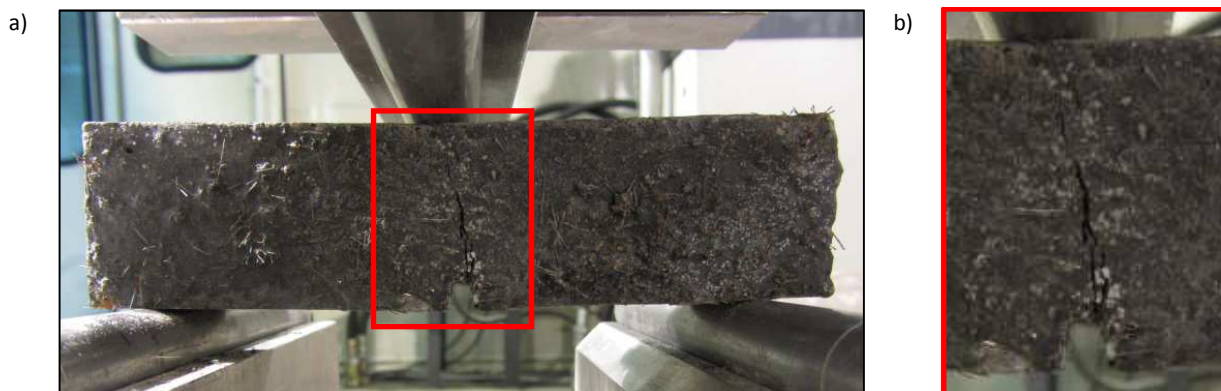


Figura 3.23 Fisuración en la probeta prismática: a) Vista general, b) Detalle

3.4.3.2 Ensayo de compresión

La resistencia a compresión se determina en cada una de las dos mitades de la probeta que resultan del ensayo de la resistencia a flexotracción. Así pues, este ensayo se realiza a 18 muestras de cada una de las 6 series fabricadas, a 28 días de edad, siguiendo la norma EN 196-1:2005.

- Ejecución del ensayo

En la realización de este ensayo se procede de manera análoga a la seguida en la campaña experimental preliminar. Utilizando la prensa IBERTEST, que está formada por dos platos de acero con las caras planas cuyo grueso debe garantizar la indeformabilidad de éstos durante la realización del ensayo, se coloca la probeta y se aplica una carga hasta que se produce su rotura. La probeta se coloca con la cara de hormigonado orientada hacia un lateral y la carga se aplica sobre una cara lisa a una velocidad de 2,40 kN/s hasta la rotura. Cabe señalar que los valores obtenidos son básicamente los de carga máxima ya que el equipo se configura para que una vez alcanzada la carga máxima de la probeta se detenga el ensayo.

3.4.3.3 Ensayo Barcelona

A grandes rasgos, se trata de un ensayo de tracción indirecta desarrollado para los HRF, que se realiza a la edad de 28 días de acuerdo con la norma española UNE-83515. De hecho, su objetivo es determinar la resistencia a la fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción del HRF mediante un ensayo de doble punzonamiento sobre una probeta cilíndrica. Como ya se ha comentado en el apartado 3.4.2.4 *Descripción de las probetas*, las dimensiones de estas probetas deben ser 150 mm de diámetro y 150 mm de altura, siendo la altura igual a su diámetro.

- Ejecución del ensayo

El control del ensayo se realiza por apertura circunferencial usando una cadena extensométrica que se coloca a media altura del cilindro. Por tanto, antes de empezar el ensayo, se coloca dicha cadena. El ensayo consiste en la aplicación de una carga central en ambas caras de la probeta cilíndrica por medio de unos discos de carga de acero de 37,5 mm de diámetro, que corresponde a un cuarto del diámetro de la probeta. Así pues, se coloca un disco sobre la máquina IBERTEST, se coloca la probeta con la cadena sobre este disco inferior y se coloca el otro disco sobre la probeta. Cabe mencionar que para asegurar que los discos

cilíndricos de carga están centrados bajo y sobre la probeta, se usa como plantilla un disco agujereado con diámetro exterior igual al diámetro de la probeta y un diámetro interior igual al del disco de carga.

Una vez los discos de carga están centrados bajo y sobre la probeta, se cierra la puerta de la máquina y se comienza el ensayo. La carga se aplica de forma uniforme con una velocidad de descenso del pistón de $0,5 \pm 0,05$ mm/min durante todo el ensayo hasta que la deformación circunferencial total desde el inicio del ensayo alcanza los 6 mm. La Figura 3.24 muestra la realización del ensayo y una probeta ensayada donde se aprecia la aparición de tres fisuras radiales.

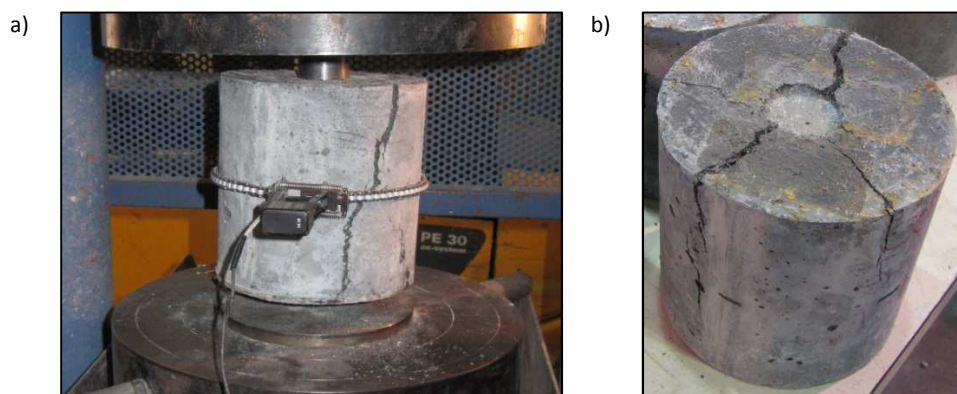


Figura 3.24 Ensayo Barcelona: a) Ejecución del ensayo, b) Probeta ensayada donde se aprecian las fisuras

3.4.3.4 Ensayo pull-out

A diferencia de los demás ensayos que solamente se realizan a la edad de 28 días, el ensayo *pull-out* se realiza a la edad de 3, 7, 28 y 90 días. Para el ensayo se utiliza un modelo sugerido en la bibliografía consultada, que consiste en someter la probeta a tracción directa registrando el desplazamiento por medio de un extensómetro a una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min (Chan Y.-W., Chu S.-H., 2004). Cabe mencionar que en el centro de la probeta, las fibras han de estar alineadas con la carga.

- Ejecución del ensayo

Antes de explicar la ejecución del ensayo, es necesario comentar ciertos aspectos de las probetas ensayadas a *pull-out*. En el momento de su fabricación, antes de llenar los moldes de 40x40x160 mm, en el centro de éstos se coloca un trozo de porexpan de 1cm de grosor para obtener dos probetas de 40x40x75 mm. Por otro lado, para conseguir que las fibras estén distribuidas longitudinalmente en la dirección de la carga aplicada, en la zona central de estas nuevas probetas, se coloca una lámina polimérica de 40x50 mm donde se insertan 25 fibras. Cabe señalar que la inserción manual de las fibras en la lámina es dificultosa y lenta ya que al clavar las fibras con la ayuda de un alicate, muchas se doblan y se han de coger otras nuevas. Así pues, las láminas se han de preparar previamente a la fabricación de las probetas. La Figura 3.25 muestra un molde de probetas de 40x40x160 mm al cual, antes de llenarlo, se le ha colocado un trozo de porexpan en el centro para obtener 6 probetas más pequeñas y en el centro de éstas, se ha colocado la lámina con las 25 fibras clavadas.

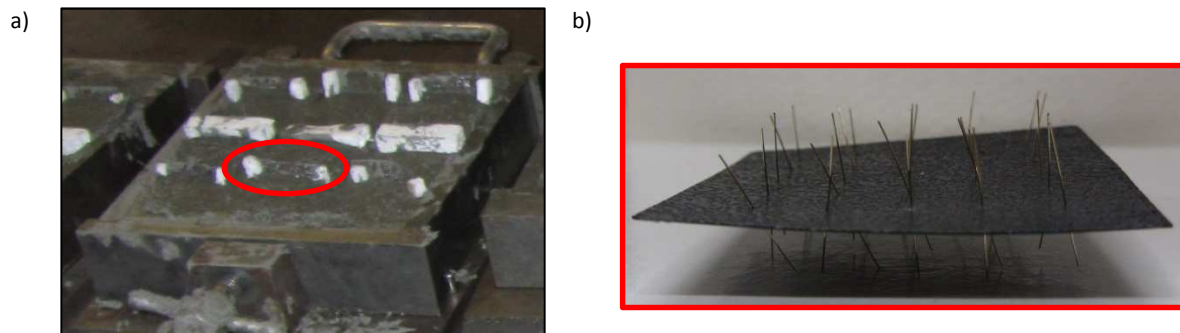


Figura 3.25 Probetas para pull-out: a) Molde lleno, b) Lámina con fibras insertadas en el mismo sentido

Una vez transcurrida la edad programada para los ensayos, las probetas se extraen de la cámara húmeda y se comienza a preparar el ensayo. En primer lugar, se enrosca uno de los discos de la prensa Instron en la parte inferior de la prensa. En segundo lugar, se pega una de las caras de 40x40 mm en otro disco y una vez secado el pegamento, este disco se enrosca en la parte superior de la prensa. A continuación, se baja la prensa hasta que la cara de 40x40 mm sin pegar esté cerca del disco inferior, se pone pegamento sobre el disco y se baja la prensa poco a poco hasta que la cara de la probeta toque al disco. Una vez el pegamento esté seco, se coloca el extensómetro, se quita el clip de seguridad y se puede comenzar el ensayo. Cabe mencionar que el equipo se programa para que el ensayo se pare cuando alcance una abertura de fisura de unos 6 mm. La Figura 3.26 muestra la preparación del ensayo y un detalle de una probeta ensayada donde se observa la abertura de fisura.



Figura 3.26 Ensayo de pull-out: a) Preparación del ensayo, b) Detalle de la abertura de fisura de una probeta ensayada

Cabe señalar que todos los ensayos realizados en esta campaña experimental son lentos, a excepción del de compresión. De hecho, para cada una de las probetas, el ensayo de flexotracción dura unos 30 minutos, el ensayo Barcelona unos 20 minutos y el de pull-out unos 40 minutos. En estos 40 minutos se tiene en cuenta tanto el tiempo del ensayo como el tiempo tardado en cambiar la probeta, quitar el pegamento a los discos utilizados y que el pegamento puesto a la nueva probeta se seque. Así pues, de no haber sido dos personas para realizar toda la campaña experimental, hubiera sido imposible realizar todos estos ensayos.

3.4.3.5 Calorimetría

En esta campaña experimental también se realiza calorimetría de los 6 hormigones fabricados ya que las dosificaciones empleadas son diferentes respecto a la de la campaña preliminar. De hecho, se ha añadido *betoflow*, se ha reducido la relación a/c a 0,2 y en algunas de las dosificaciones, se ha aumentado el contenido de fibras en volumen. Por tanto, como las

dosificaciones son diferentes, en la presente campaña experimental también es interesante conocer la velocidad de evolución del calor generado durante la hidratación del hormigón.

El calor de hidratación se ensaya en la misma cámara adiabática usada en la campaña preliminar y el procedimiento seguido para realizar la calorimetría es análogo al de la campaña anterior, explicado en el apartado 3.3.4.3 *Calorimetría*. Así pues, se preparan muestras de unos 50 gramos de cada serie fabricada. Para ello, se pesan las cantidades de los materiales, se mezclan los sólidos, se añaden los líquidos, se mezcla la muestra hasta conseguir una consistencia bastante fluida y poco a poco, se comienza a incorporar la fibra. Una vez mezclados todos los materiales, se vibra la mezcla, se introduce en la cámara y se comienza el ensayo, el cual se programa para 72 horas. Transcurrido el tiempo, se sacan las muestras y se pesan.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA PRELIMINAR

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se han explicado los ensayos realizados durante la campaña experimental preliminar. La ejecución de estos ensayos ha permitido la obtención de numerosos resultados que en el presente capítulo serán tratados adecuadamente para poder realizar un análisis y extraer conclusiones.

Para poder presentar dichas conclusiones, se recopilan los resultados obtenidos de cada caso estudiado y se decide agruparlos por ensayos. Por un lado, se agrupan aquellos ensayos que se realizan a la fibra de acero para estudiar la eficacia de cada etapa del tratamiento. Por otro lado, se agrupan aquellos ensayos que se realizan al hormigón para estudiar la efectividad global del tratamiento al incorporar fibra tratada en la matriz de un HUAR. A continuación, se analizan los resultados de los ensayos y se descartan aquellos casos que reúnan peores condiciones para así no reproducirlos en la próxima campaña experimental.

4.1.1 Objetivos

La campaña experimental preliminar pretende acotar las variables del tratamiento previo de las fibras metálicas. Se trata de un tratamiento que todavía se encuentra en fase de desarrollo y por consiguiente, hay parámetros de la metodología que deben ser optimizados. Uno de

estos parámetros es la concentración de silano para realizar la funcionalización de las fibras. Por otra parte, una vez tratada la fibra, se pretende conocer el comportamiento del hormigón y la influencia de las variables de la dosificación empleada. En este capítulo se presentan y se analizan todos estos resultados.

Teniendo esto en cuenta, a lo largo del capítulo se pretende dar respuesta a los objetivos específicos siguientes:

- Corroborar que los parámetros que intervienen en las diferentes etapas del tratamiento y que fueron tomados de trabajos anteriores como óptimos realmente son los adecuados
- Determinar todos aquellos parámetros de la metodología que aún no han sido definidos
- Evaluar el comportamiento de la fibra tratada al incorporarla como refuerzo en el HUAR

4.1.2 Organización del capítulo

Como ya se ha dejado entrever previamente, el presente capítulo se estructura diferenciando el análisis de los resultados de los ensayos realizados a las fibras tratadas, del análisis de los resultados de caracterización del hormigón. Así pues, en el apartado 4.2 se analizan los resultados del estudio de la efectividad de las etapas del tratamiento y en los apartados 4.3 y 4.4, se analizan todos los ensayos relacionados con el estudio del hormigón en estado fresco y endurecido, respectivamente.

4.2 Evaluación visual de la funcionalización de las fibras

En este apartado, se realiza una evaluación visual de la fibra tratada para destacar las observaciones que se hicieron durante el proceso de funcionalización. Primero de todo, es necesario matizar que en este apartado por funcionalización de las fibras se refiere a todas las etapas del tratamiento. Es decir, no solo incluye la tercera etapa de la metodología referente a la funcionalización en sí de la fibra con silano, sino que también incluye el primer baño en acetona, el segundo baño en hidróxido de sodio y el cuarto baño en hidróxido de calcio.

Tal y como se ha detallado en el capítulo anterior, la fibra de acero se desengrasa con acetona para eliminar los residuos orgánicos adheridos a la fibra durante su etapa de fabricación, dejándola libre de grasa y residuos físicos. Una vez desengrasada, se sumerge en una disolución de NaOH para activar su superficie ya que ésta debe de estar activada para que el posterior recubrimiento con silano sea efectivo. A continuación, se realiza la funcionalización de la fibra sumergiéndola en una solución de silano diluido del tipo TEOS. Por último, la fibra funcionalizada se sumerge en una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para reaccionar con la capa de silano y favorecer así la formación de C-S-H durante la hidratación del cemento y aumentar la compatibilidad de la fibra con la matriz cementicia.

En la Figura 4.1 se muestran los diferentes aspectos que presenta la fibra de acero dependiendo de la etapa en que se encuentre. Como se puede observar, a simple vista es muy difícil distinguir si se trata de fibra de referencia o desengrasada o si se trata de fibra activada,

funcionalizada o tratada. De ahí la importancia de ser extremadamente organizado al trabajar con tantas muestras que son tan parecidas entre sí. Por ello, se ha usado la nomenclatura recogida en la Tabla 3.3 del capítulo anterior que permite una rápida identificación de la fibra y etapa de la que procede.

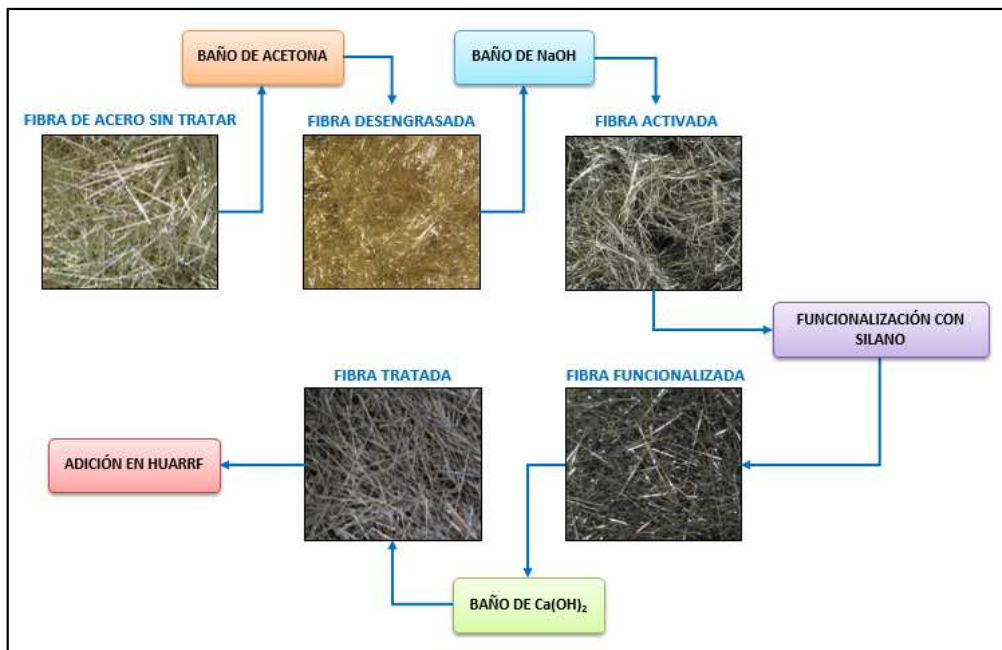


Figura 4.1 Muestras de fibra procedentes de las diferentes etapas del tratamiento

El análisis visual de estas imágenes muestra que tanto la fibra de referencia como la fibra desengrasada se caracterizan por presentar un color dorado. No obstante, cuando la fibra de referencia se desengrasa con acetona, ésta pierde las impurezas que daban opacidad a su superficie y la tonalidad dorada de la fibra desengrasada se ve acentuada. Pero este aumento del grado de brillantez es tan pequeño que diferenciar ambas fibras a simple vista es una tarea complicada. Después del desengrase, llega el turno de la activación de la superficie de la fibra mediante una disolución de NaOH. Esta disolución es tan corrosiva que la fibra activada pierde el color dorado característico de las etapas anteriores, presentando ahora un color plateado. En este momento del tratamiento, es la única situación en que la fibra se puede diferenciar claramente de su predecesora.

A continuación, la fibra activada pasa por la etapa de funcionalización y posteriormente, por la inmersión en Ca(OH)_2 . Se observa que la tonalidad de la fibra funcionalizada es más oscura en comparación con la fibra activada debido a la deposición del silano sobre la fibra. Asimismo, se observa que la fibra tratada presenta una tonalidad más clara comparándola con la funcionalizada probablemente debido a que cuando el silicio reacciona con el Ca(OH)_2 , se debe formar algún compuesto de calcio en la superficie. Sin embargo, todas estas diferencias son tan sutiles que la única forma de distinguirlas con éxito es teniéndolas bien identificadas.

Como se puede observar, el análisis visual de estas imágenes no evidencia la eficacia del tratamiento ya que solo da información de los cambios físicos referentes al color y a la tonalidad que experimentan las fibras después de cada etapa. Por tanto, a simple vista no es posible conocer si hay indicio de revestimiento en la superficie de las fibras. Por ello, antes de

realizar otros ensayos más complejos, se decide hacer un recuento manual del número de fibras de acero que hay en un gramo de ellas. Con este ensayo se puede tener una primera información de si las fibras tratadas han sido revestidas o no ya que la capa de silano debería aumentar el peso de la fibra tratada y por tanto, en un gramo de esta fibra debería haber menos fibras que en un gramo de fibra de referencia. La Tabla 4.1 recoge algunos de los casos estudiados donde se cumple esta relación. La fibra de estos casos ha sido tratada con diferentes concentraciones de TEOS y previamente desengrasadas, tal y como se puede identificar en su nomenclatura.

Tabla 4.1 Recuento manual de fibras: n° fibras/gramo

CASOS	NOMENCLATURA	N° DE FIBRAS/g	mg/FIBRA
Caso 1	REF	483	2,07
Caso 7	T_0,1%_A	477	2,10
Caso 11	T_1%_A	389	2,57
Caso 15	T_10%_A	326	3,07

Para llevar a cabo este ensayo, se pesó aproximadamente 0,5g de cada uno de los casos estudiados, se contaron cuantas fibras había y se hizo una equivalencia con 1g. Analizando los valores de la Tabla 4.1, se observa que se cumpliría la relación anteriormente comentada ya que en los casos de fibra funcionalizada (casos 7, 11 y 15), el número de fibras por gramo es inferior al número de fibras de referencia por gramo (caso 1). Por ejemplo, en el caso T_10%_A se contaron unas 326 fibras/g frente a las 483 fibras/g contadas en el caso REF. Ello podría deberse a la presencia de silano en la superficie de las fibras tratadas, haciendo que éstas pesasen más y que en un gramo hubiera menos. De hecho, el caso T_10%_A presenta un aumento de peso del 48,31% con respecto a las fibras del caso REF. Asimismo, se observa que cuanto mayor es la concentración de silano menor es el número de fibras por gramo. Esto hace pensar que si el espesor de la capa de silano es mayor, estas fibras pesarán más y en un gramo habrá menos, tal y como lo confirman los valores de la Tabla 4.1.

No obstante, cabe señalar que la información obtenida con este ensayo no permite saber si la capa de silano de las fibras tratadas es homogénea ni si la superficie de estas fibras presenta más rugosidad que la superficie de la fibra sin tratar, ya que este hecho mejoraría la adherencia física de la fibra con la matriz. Por ello, es necesario realizar otro tipo de ensayos como microcopia óptica o microscopia electrónica de barrido (SEM) para obtener imágenes del aspecto que presenta la superficie de la fibra tratada.

4.3 Ensayos de las fibras

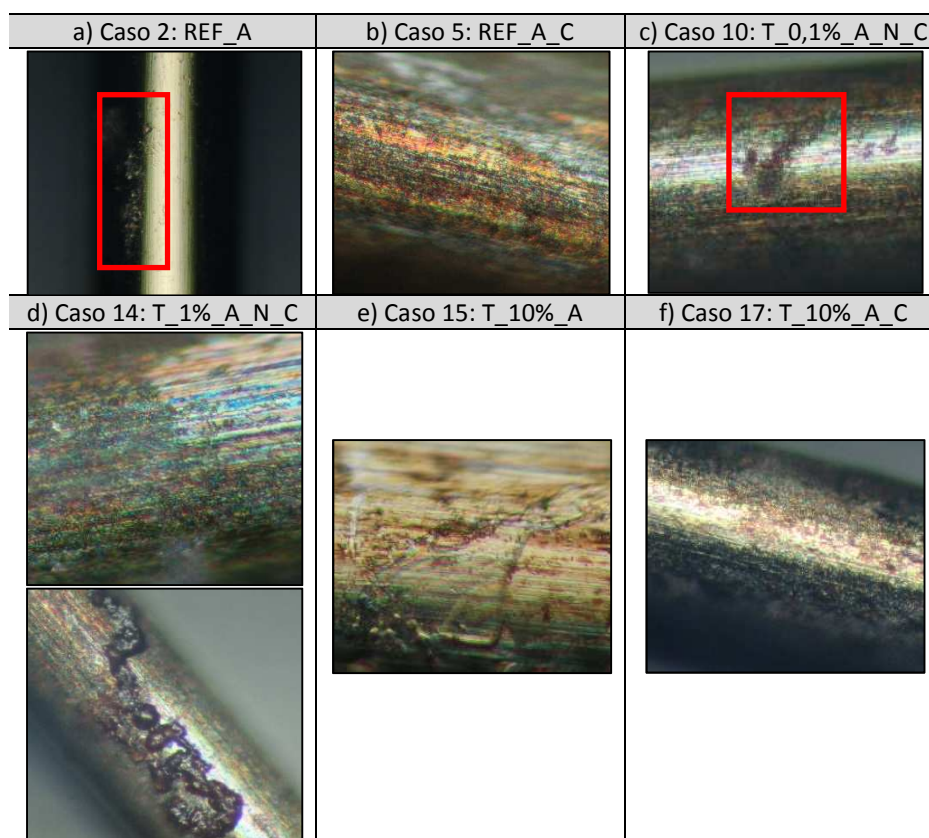
En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante la microscopia óptica, la microscopia electrónica de barrido y además, se determina el ángulo de contacto que se obtiene al introducir una fibra de acero tratada en una gota con pH básico (pH 12,5). Mientras que la microscopia óptica y el ensayo del ángulo de contacto solamente permiten confirmar si la superficie de la fibra presenta vestigios de revestimiento con silano, la microscopia electrónica de barrido proporciona una información mucho más precisa tanto de la forma y de la textura de la muestra analizada como de la composición química de los materiales que la componen.

4.3.1 Microscopía óptica

Este tipo de ensayo permite realizar un examen visual de la superficie de la fibra de acero. Para poder estudiar cómo influye cada etapa del tratamiento en la superficie de la fibra metálica, se realiza microscopía óptica a los 18 casos objeto de estudio de la campaña experimental preliminar (recogidos en la Tabla 3.3) y se toma como referencia la superficie de la fibra sin tratar. Mediante el análisis de la superficie se pretende encontrar matices que diferencien un caso de otro y que sirvan para descartar los casos que presenten peores resultados.

La Tabla 4.2 recoge imágenes de algunos de los casos estudiados. Estos casos corresponden tanto a muestras de fibra de referencia como a muestras de fibra funcionalizada. Las muestras de fibra de referencia corresponden a fibra de referencia desengrasada (caso 2) y a fibra de referencia desengrasada y bañada en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (caso 5). Por otro lado, las muestras de fibra funcionalizada corresponden a fibra funcionalizada con una concentración de silano de 0,1% y 1% que ha pasado previamente por la etapa de desengrase y posteriormente por los baños de NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (casos 10 y 14, respectivamente). También se muestran imágenes de fibra funcionalizada con una concentración de 10%, una de ellas únicamente desengrasada y la otra fibra desengrasada y bañada posteriormente en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (casos 15 y 17, respectivamente).

Tabla 4.2 Análisis fotográfico: a) REF_A, b) REF_A_C, c) T_0,1%_A_N_C, d) T_1%_A_N_C, e) T_10%_A, f) T_10%_A_C



En primer lugar, es necesario recordar que la fibra de referencia utilizada es de tipo lisa. Sin embargo, en la fibra del caso REF_A se observan rugosidades en la superficie que no pueden deberse a la presencia de impurezas ya que en este caso en cuestión, la fibra ha sido limpiada

químicamente con acetona para eliminar los residuos orgánicos adheridos a la fibra durante su fabricación. Así pues, analizando la imagen obtenida con microscopia óptica de dicho caso se intuye que la fibra sin tratar no es tan lisa como se pensaba. Ello podría deberse a imperfecciones de la etapa de fabricación. Por otro lado, la fibra del caso REF_A_C presenta una rugosidad bastante homogénea que podría ser resultado de la deposición de una capa de hidróxido de calcio en toda la superficie de la fibra.

Respecto a las fibras funcionalizadas de los casos T_0,1%_A_N_C y T_1%_A_N_C, que son fibras que han pasado por las cuatro etapas del tratamiento diferenciándose entre ellas únicamente en la concentración de TEOS, se observan acumulaciones sobre las superficies con aspecto resinoso de algún compuesto químico sin identificar. En cambio, dichas acumulaciones no se observan en la imagen tomada del caso T_10%_A_C lo que deja entrever que éstas podrían ser resultado de la combinación química de los baños de NaOH e Ca(OH)_2 ya que la fibra de este último caso también ha sido funcionalizada y tratada con Ca(OH)_2 , pero no ha sido bañada en la disolución de sodio.

Retomando el tema de la rugosidad, al igual que la imagen del caso REF_A_C, la del caso T_10%_A_C también muestra indicio de presentar una rugosidad homogénea en toda la superficie de la fibra. En cambio, la primera imagen del caso T_1%_A_N_C presenta una zona donde la deposición de los materiales parece más densa y otra donde dicha deposición parece más dispersa. Ello podría deberse a la formación de erizos ya que cuando las fibras están siendo agitadas en las disoluciones, empiezan a entrelazarse fuertemente debido al contacto entre ellas y la disolución no puede llegar a las fibras que quedan en el interior de dichos erizos. No obstante, también podría deberse a la separación de dos fibras, es decir, dos fibras podrían haber quedado enganchadas durante la agitación y al despegarse, una se podría haber llevado parte del revestimiento de la otra. Por otro lado, la imagen del caso T_10%_A también muestra la presencia no homogénea de una capa transparente de silano.

Una vez analizadas las imágenes obtenidas con microscopia óptica, parece ser que el tratamiento no garantiza un recubrimiento homogéneo ya que hay fibras que presentan zonas con más rugosidad que otras (casos 14 y 15 acabados de analizar). Por ello, es necesario conocer si el espesor de la capa de silano de las zonas donde la rugosidad es más dispersa sería suficiente para mejorar la adherencia fibra-matriz ya que un espesor insuficiente comprometería la eficacia del tratamiento. También es necesario conocer si la capa de silano en las zonas donde la rugosidad es más densa no presenta un exceso de espesor ya que una capa gruesa sería más débil y quebradiza comprometiendo también la efectividad del tratamiento. Así pues, es necesario determinar el espesor óptimo de la capa de silano, encontrando previamente la concentración de TEOS más adecuada.

4.3.2 Ángulo de contacto

Este ensayo es otro de los métodos que permite comprobar si las fibras de acero están revestidas después de haber pasado por las etapas del tratamiento. Dicha comprobación se realiza introduciendo una fibra de acero en una gota de disolución y midiendo el ángulo que se forma a cada lado de la fibra al ir sacándola de la gota. Al haber realizado la funcionalización con TEOS, estas fibras deberían presentar un comportamiento hidrófilo. Por tanto, si la

funcionalización es efectiva, la gota debería mojar la superficie de la fibra generando adhesión entre ambos materiales y un ángulo a cada lado de la fibra inferior a 90° . Cabe mencionar que la disolución utilizada tiene un pH básico de 12,5 para simular la alcalinidad del hormigón y así obtener resultados que se ajusten lo máximo posible a la realidad.

El ángulo de contacto se determina haciendo la media de los dos ángulos que se forman a cada lado de la fibra. En la Figura 4.2 se muestra dicho ángulo de contacto para cada uno de los 18 casos estudiados en la campaña experimental preliminar. En el eje de las abscisas se muestra la nomenclatura de los casos estudiados mientras que en el eje de las ordenadas se tiene el ángulo de contacto en grados. Por otro lado, las letras A, N y C de la nomenclatura del eje de abscisas significan que las fibras han pasado por los baños de acetona, de NaOH y/o de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, respectivamente.

En el gráfico de la Figura 4.2.b) se observa que la tendencia del ángulo de contacto es similar en prácticamente todos los casos. Así, para las fibras funcionalizadas con una concentración de TEOS de 0,1% el ángulo de contacto es menor que en las fibras funcionalizadas con una concentración de 10%. Ello indica que el ángulo de contacto tiende a aumentar cuanto mayor es la concentración de TEOS. Estos casos corresponden a fibras que fueron únicamente funcionalizadas (casos 7, 11 y 15 / casos _A), a fibras que fueron funcionalizadas y previamente bañadas en NaOH (casos 8, 12 y 16 / casos _A_N) y a fibras que fueron funcionalizadas, previamente bañadas en NaOH y posteriormente en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (casos 10, 14 y 18 / casos _A_N_C). Cabe recordar que todas ellas pasaron por la etapa de desengrase antes de la funcionalización y de la inmersión en NaOH.

Sin embargo, en los casos donde las fibras fueron funcionalizadas, previamente desengrasadas y posteriormente bañadas en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (casos 9, 13 y 17 / casos _A_C), el comportamiento es el inverso y la diferencia de ángulo entre las concentraciones es menor. De hecho, se observa que el ángulo de contacto disminuye levemente a medida que también disminuye la concentración de TEOS.

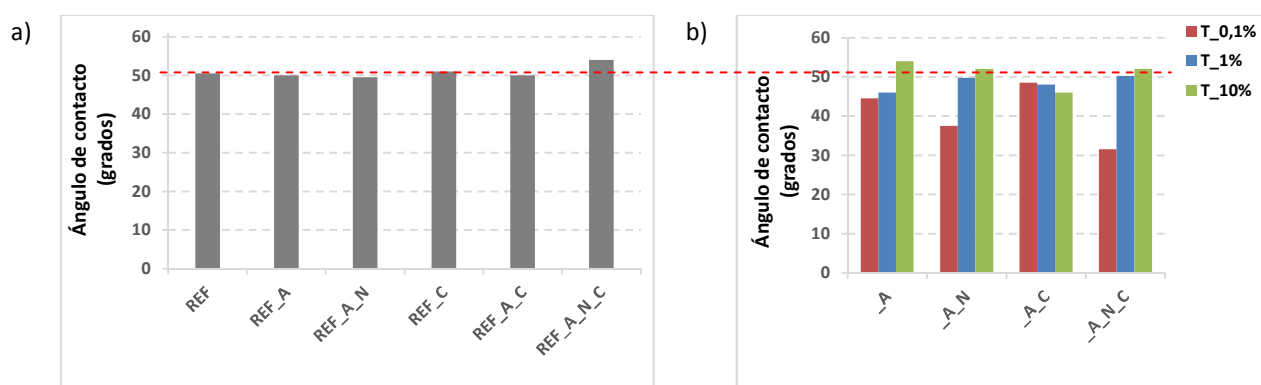


Figura 4.2 Ángulo de contacto: a) de las fibras de referencia, b) de las fibras tratadas

Por otro lado, se observa que el ángulo de contacto de la fibra de referencia es de $50,5^\circ$ lo que implicaría que este tipo de fibra ya muestra un comportamiento hidrófilo al presentar un ángulo inferior a 90° . Por tanto, para que la utilización de TEOS mejore la adhesión entre la fibra y la gota, las fibras funcionalizadas deberían presentar un ángulo de contacto inferior al de la fibra de referencia. Analizando los gráficos, se observa que las fibras funcionalizadas con

una concentración de 0,1% y 1% presentan un ángulo de contacto menor que la fibra sin tratar. Por tanto, en estos casos la utilización de TEOS mejoraría la adhesión.

No obstante, este comportamiento no se observa en la mayoría de las fibras funcionalizadas con una concentración de 10% (casos 15, 16 y 18). De hecho, en estos casos los ángulos de contacto (54,0°, 52,0° y 52,0°, respectivamente) son superiores al de la fibra de referencia (50,5°) lo que implica que el tratamiento con TEOS no mejoraría la adhesión entre la fibra y la gota. Así pues, todo parece indicar que la concentración de 10% produciría el efecto inverso, lo que podría significar que esta concentración es excesiva para funcionalizar fibras metálicas de este tipo.

4.3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Este ensayo permite obtener análisis cualitativos de la composición de la fibra de referencia, de la desengrasada, de la activada, de la funcionalizada y de la tratada, es decir, de la fibra procedente de todas las etapas del tratamiento. Las imágenes que se obtienen con este ensayo no solo proporcionan información química de la capa de revestimiento sino que también proporcionan información de su forma y textura permitiendo estudiar cómo influye la concentración de TEOS en la capa de revestimiento de la fibra. A continuación, se muestran imágenes de los casos 8, 12, 16 y 18 estudiados en la campaña experimental preliminar.

4.3.3.1 Caso 8: T_0,1%_A_N

Este caso 8 corresponde a fibra funcionalizada con TEOS con una concentración de 0,1% que ha pasado por el baño de acetona e NaOH. En la Figura 4.3.a) se muestra, mediante SEM, la imagen de una de las fibras funcionalizadas de dicho caso estudiado. Analizando esta Figura, se observa que la fibra presenta un revestimiento homogéneo y al hacer una ampliación de una de sus zonas (Figura 4.3.b), se corrobora la homogeneidad del recubrimiento, se observa cierta rugosidad en la superficie y ausencia de poros. Al ser una fibra funcionalizada con TEOS, dicho revestimiento debería corresponder a la capa de silano y para comprobar que esto es así, se realiza un análisis de uno de los puntos de la zona ampliada (Figura 4.3.c). Este análisis puntual confirma la presencia de elevadas cantidades de hierro y carbono, componentes mayoritarios de la fibra de acero, y de cobre y zinc debido a que la fibra de acero está revestida de latón. Por tanto, haber obtenido una identificación tan clara de dichos elementos, indica que la funcionalización de la superficie de la fibra no ha sido efectiva ya que no hay rastro de silicio, componente del silano.

El hecho de no haber encontrado ningún indicio de silicio en la zona analizada podría significar que la concentración de TEOS de 0,1% es insuficiente para revestir la superficie de la fibra. Si esto fuera confirmado, se debería descartar esta concentración para futuras campañas experimentales. No obstante, la ausencia de silicio en esta muestra analizada también podría deberse a que el método de funcionalización no puede garantizar el revestimiento de todas las superficies debido a la formación de erizos. Como ya se ha comentado, las fibras se entrelazan fuertemente durante la agitación imposibilitando que la disolución llegue a las fibras que quedan atrapadas en el interior del erizo. Así pues, esta fibra podría haber permanecido en el

interior de algún erizo durante la agitación lo que explicaría la ausencia de silano en su superficie.

Evitar la formación de erizos es una tarea complicada ya que éstos se forman simplemente al estar las fibras en contacto. Por ello, se deberían buscar procesos de funcionalización alternativos al *dip-coating*, que es el empleado en la campaña experimental preliminar, donde el contacto constante de las fibras se viera dificultado. Otra opción también sería reducir la cantidad de fibra funcionalizada en una misma vez. De hecho, en la campaña preliminar se funcionalizan 300g de fibra activada en cada litro de disolución de silano y quizás, reduciendo esta cantidad a la mitad se podría reducir o incluso evitar la formación de erizos.

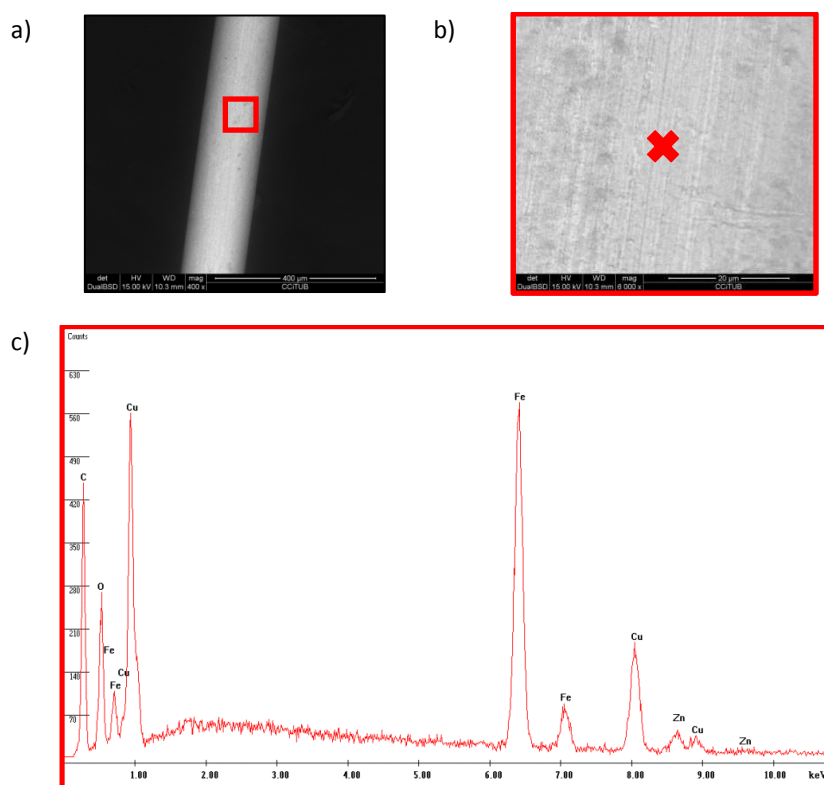


Figura 4.3 Imagen SEM del Caso 8 T_{0,1%}_A_N: a) Vista general de la fibra, b) Detalle, c) Espectro del SEM de la superficie

4.3.3.2 Caso 12: T_{1%}_A_N

Este caso 12 corresponde a fibra funcionalizada con TEOS con una concentración de 1% que ha pasado por los baños previos de acetona e NaOH. En la Figura 4.4.a) se muestra la imagen de una de las fibras funcionalizadas de este caso. Con el análisis de esta Figura 4.4, se espera encontrar indicio de silicio en la superficie de la fibra. Ello indicaría que la concentración de 1% podría ser la adecuada para recubrir la superficie de la fibra ya que la concentración de 0,1% del caso anterior estudiado resultó baja e insuficiente para anclar el silano a la superficie.

Volviendo al estudio de la fibra, en la Figura 4.4 se observa que ésta presenta un revestimiento no homogéneo, cierta rugosidad en la superficie y ausencia de porosidad. La no homogeneidad del recubrimiento se percibe al diferenciarse claramente dos regiones, una con una deposición de materiales más tupida que la otra.

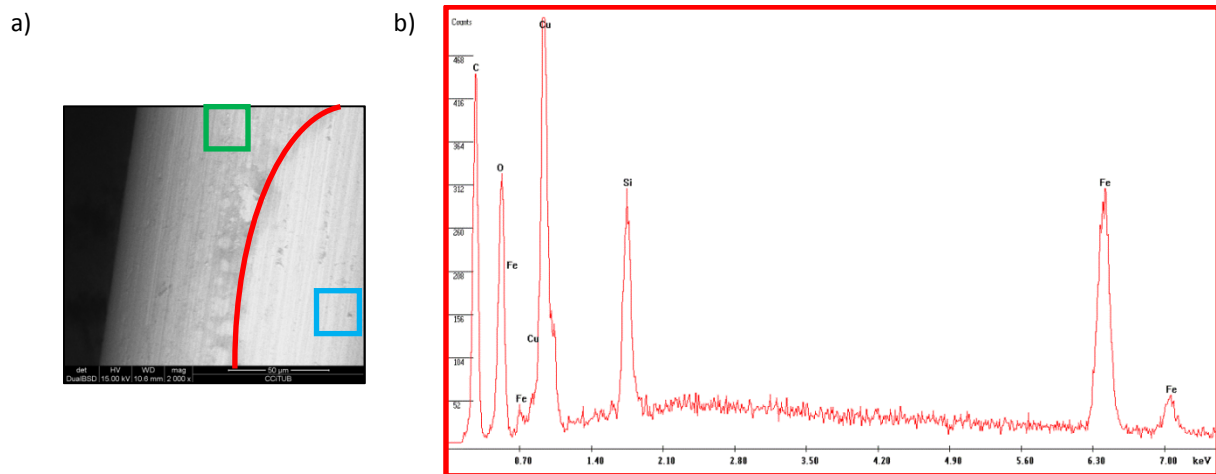


Figura 4.4 Imagen SEM del Caso 12 T_1%_A_N: a) Vista general de la fibra, b) Espectro del SEM de la zona de transición

Analizando la zona de transición entre estas dos regiones (línea roja), se confirma nuevamente la presencia de cobre, hierro y carbono (Figura 4.4.b). Ello se debe a que estos elementos químicos son inherentes a la fibra, es decir, forman parte de la composición química de la fibra metálica empleada en la campaña experimental. Por otra parte, también se observa una elevada cantidad de silicio lo que indicaría que en este caso la funcionalización de la fibra se habría realizado de forma satisfactoria, siendo apropiada la concentración de TEOS de 1%. No obstante, para poder realizar esta afirmación, previamente se debe verificar si en las dos regiones diferenciadas también se detecta silicio.

Así pues, una vez examinada la zona de transición y confirmada la presencia de silicio en ella, se procede a la búsqueda de este elemento químico en las dos regiones diferenciadas. La Figura 4.5 muestra un detalle de la región donde el revestimiento es más denso y el análisis químico de dicha región, identifica una cantidad muy elevada de silicio por lo que la presencia de este elemento quedaría confirmada.

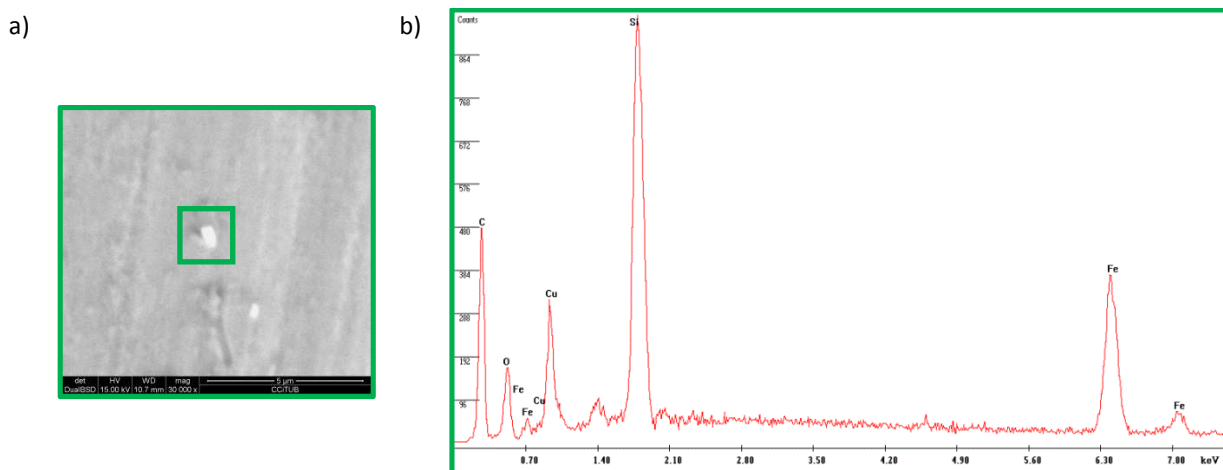


Figura 4.5 Imagen SEM del Caso 12 T_1%_A_N: a) Detalle de la zona más densa del revestimiento, c) Espectro del SEM de la acumulación

Cabe mencionar que la elección del punto analizado en la Figura 4.5 no fue aleatoria. De hecho, se escogió este punto por parecer un punto de acumulación de materiales. De este modo, en el caso de que hubiera silicio, éste se identificaría más fácilmente, que fue lo que

sucedió, y se demostraría así que era un punto de acumulación. Por consiguiente, si el silicio se acumulaba en ciertos pliegues presentes en la superficie de la fibra, se demostraría que la superficie presentaba cierta rugosidad. La rugosidad de la superficie de la fibra es un aspecto muy importante ya que al querer utilizar la fibra tratada como refuerzo del HUAR, ésta mejoraría la adherencia entre la fibra y la matriz.

Por otro lado, en la Figura 4.6 se muestra la región que presenta un recubrimiento menos denso. Analizando esta Figura, también se observa cierta rugosidad en su superficie y presencia de silicio aunque en menor cantidad que en la capa de silano de la región más densa (Figura 4.5.b). Ello podría deberse a que esta fibra se hubiera quedado enganchada a otra durante la funcionalización y al despegarse, la otra fibra podría haberse llevado parte del revestimiento de ésta.

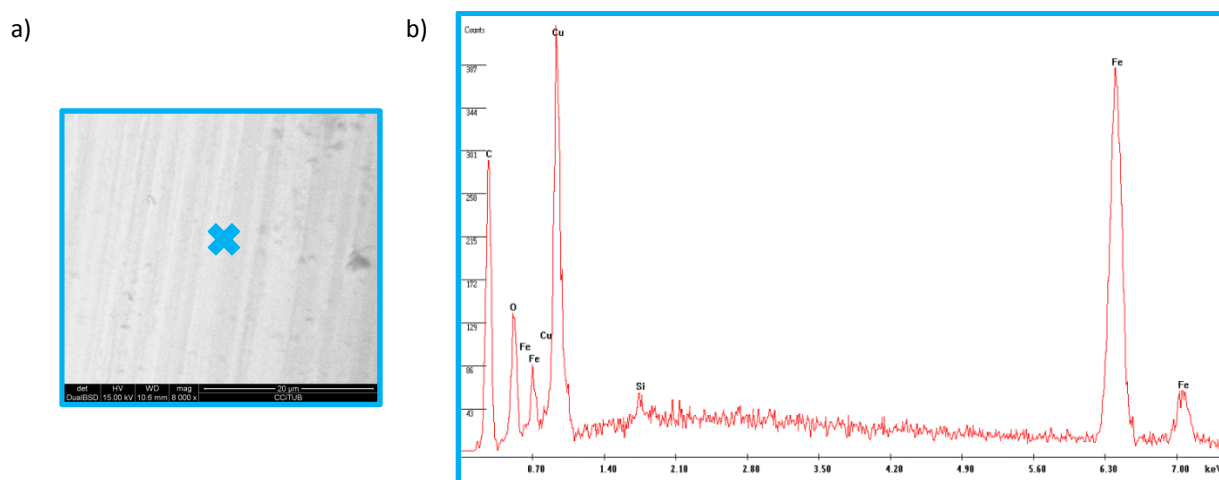


Figura 4.6 Imagen SEM del Caso 12 T_1%_A_N: a) Detalle de la zona menos densa del revestimiento, c) Espectro del SEM de la superficie

Así pues, una vez confirmada la presencia de silicio en la zona de transición y en las dos regiones separadas por ésta, se podría asegurar también la existencia de la capa de silano. Ello implicaría que la funcionalización de la fibra se habría realizado satisfactoriamente, siendo la concentración de TEOS de 1% muy adecuada para el revestimiento de este tipo de fibra metálica.

4.3.3.3 Caso 16: T_10%_A_N

Este caso 16 corresponde a fibra funcionalizada con TEOS con una concentración de 10% que ha pasado por el baño de acetona e NaOH. En la Figura 4.7 se muestran imágenes de una de las fibras funcionalizadas de este caso. Analizando esta Figura, se observa un recubrimiento de la superficie tan espeso que difumina la rugosidad característica de los casos anteriores (casos 8 y 12). Teniendo en cuenta que interesa la presencia de esta rugosidad para mejorar la adherencia entre la fibra y la matriz, este recubrimiento excesivo podría ser motivo suficiente para descartar la utilización de la concentración de 10% en próximas campañas experimentales. Cabe mencionar que en este caso tampoco se observan poros en el revestimiento.

Por otro lado, al realizar un análisis químico en un punto de la superficie, se confirma la presencia de los componentes mayoritarios de la fibra metálica utilizada (cobre, hierro y carbono) y también se observa un pico de silicio. La cantidad de silicio en este punto no es muy alta en comparación con la de los componentes de la fibra, pero si en otros puntos de la fibra se identificaran picos de silicio elevados que no fueran puntos de acumulación de dicho elemento, podría indicar que la concentración de TEOS de 10% es excesiva. Esto explicaría que la capa de silano difuminase la rugosidad de la superficie y reforzaría la idea de descartar esta concentración en futuras investigaciones.

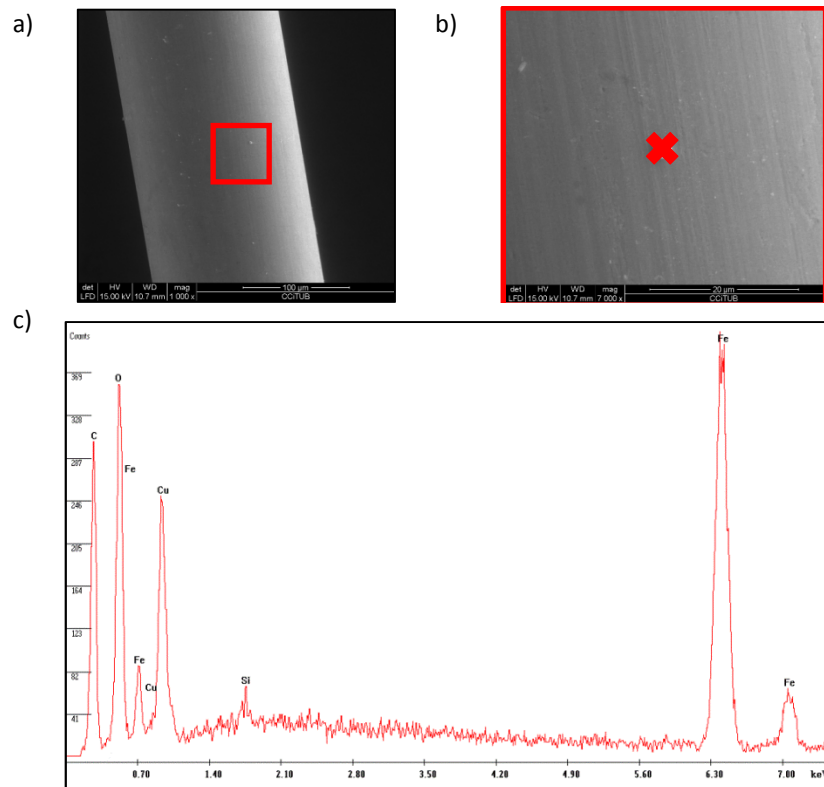


Figura 4.7 Imagen SEM del Caso 16 T_10%_A_N: a) Vista general de la fibra, b) Detalle, c) Espectro del SEM de la superficie

4.3.3.4 Caso 18: T_10%_A_N_C

El caso 18 corresponde a fibra funcionalizada con TEOS con una concentración de 10% que ha pasado por los baños previos de acetona e NaOH y por el baño posterior de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Después de haber observado que la concentración de TEOS de 10% del caso anterior mostraba indicios de ser desmesurada, se decide estudiar otra fibra funcionalizada con la misma concentración de silano para constatar si esta concentración es realmente excesiva. Así pues, examinado la Figura 4.8.a), se observa un recubrimiento de la superficie de la fibra no homogéneo que posiblemente se deba a una rotura del mismo. Este comportamiento puede ser atribuido a que una disolución muy concentrada proporciona un mayor espesor de recubrimiento pero que resulta en muchos casos débil y quebradizo (Ooij W. J. Van *et al.*, 2004).

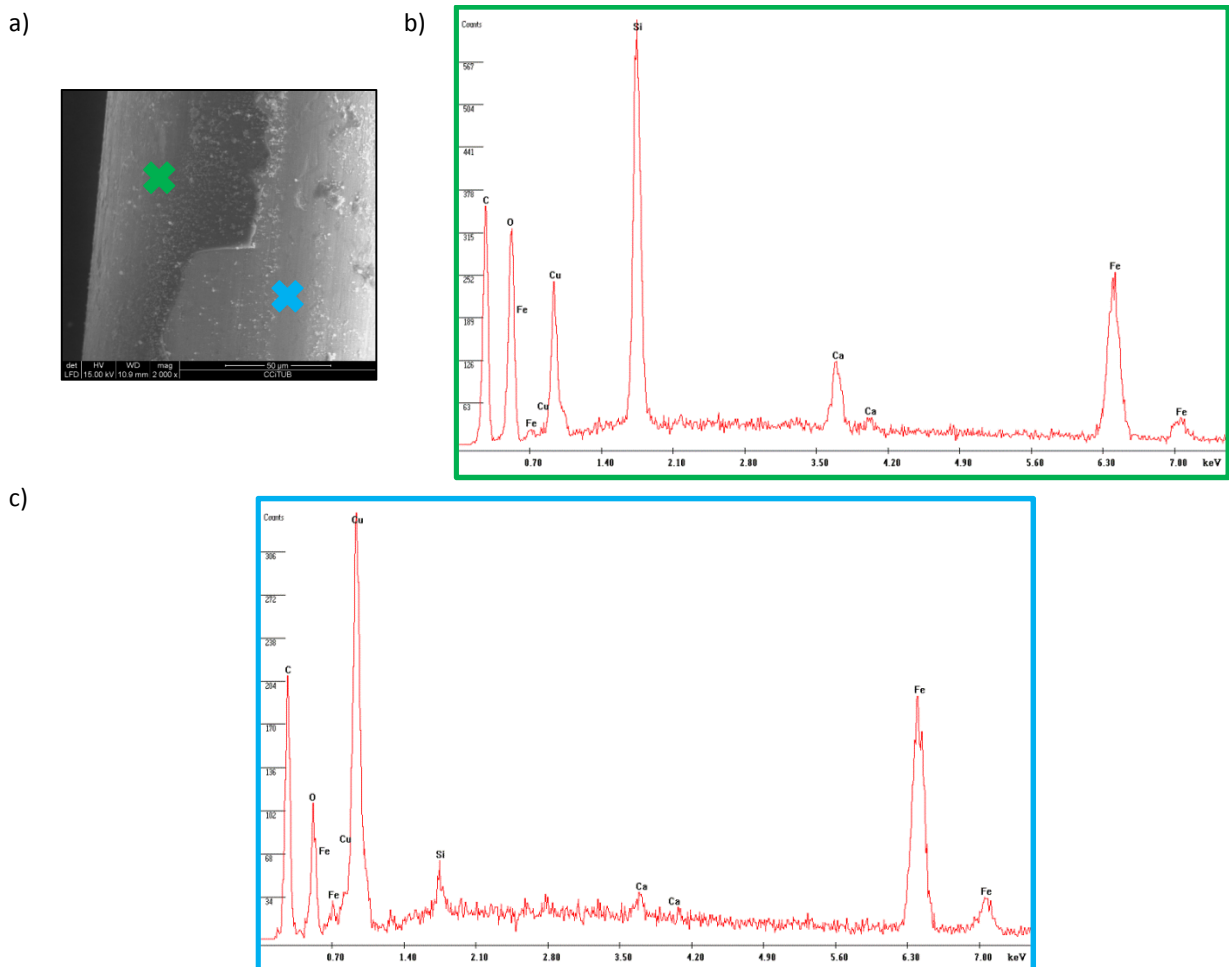


Figura 4.8 Imagen SEM del Caso 18 T_10% A_N_C: a) Detalle de la fibra, b) Espectro del SEM de la zona con mayor espesor de recubrimiento, c) Espectro del SEM de la zona con menor espesor de recubrimiento

Por otro lado, el análisis químico de la zona con mayor espesor de recubrimiento muestra que la presencia de silicio es excesiva ya que no se trata de un punto de acumulación puntual sino que estos niveles tan altos de silicio se dan en todo el recubrimiento (Figura 4.8.b). Este exceso de silicio, que está relacionado con una alta concentración de TEOS, sería el causante de que el recubrimiento se quiebre. De hecho, si se utilizara esta fibra como refuerzo del HUAR, la resistencia estructural del material podría verse comprometida. En cambio, el análisis químico de la zona con menor espesor de recubrimiento muestra que la presencia de silicio es bastante significativa sin llegar a ser excesiva (Figura 4.8.c). Por tanto, el espesor de la capa de silano en esta zona ya podría ser suficiente para que la fibra reaccionase con la matriz y mejorase las propiedades de la zona de transición fibra-matriz. Así pues, para conseguir un espesor con estas características, no sería necesaria una concentración de TEOS de 10%.

4.3.3.5 Análisis general de la información

Comparando los resultados de SEM de los cuatro casos estudiados, se podría concluir que las concentraciones de TEOS de 0,1% y 10% no serían recomendables al presentar sus fibras signos de falta de recubrimiento y exceso de él, respectivamente. Mientras que en la fibra funcionalizada con una concentración de 0,1% no hay presencia de silicio en su superficie, la fibra funcionalizada con una concentración de 10% muestra un aspecto quebradizo que muy

posiblemente se deba a que el exceso de silano ha formado un recubrimiento de gran espesor pero débil que tiende a romperse. En cambio, en la fibra funcionalizada con una concentración de TEOS de 1% hay presencia de silicio y la superficie presenta cierta rugosidad que podría mejorar la adherencia entre la fibra y la matriz. Dicha rugosidad podría ser la modificación de la superficie que se pretendía conseguir al realizar la funcionalización.

4.4 Fabricación del hormigón

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados durante la fabricación del hormigón, es decir, de aquellos ensayos ejecutados cuando el hormigón aún estaba en estado fresco. Estos ensayos son la determinación de la trabajabilidad del hormigón y la realización de calorimetría.

4.4.1 Trabajabilidad del HUARRFA

El objetivo de este ensayo era determinar la consistencia del hormigón fabricado utilizando la mesa de sacudidas. La dosificación empleada se diseñó para obtener hormigones con consistencia fluida entre 200 mm y 250 mm de diámetro (NPCA, 2013). Para mejorar la trabajabilidad de la mezcla se utilizó nanosilice, una arena cuyo árido más grande era de 0,6mm y aditivo superplastificante que permitiera reducir la relación a/c sin afectar a la trabajabilidad.

En la Figura 4.9 se muestra la trabajabilidad para cada una de las 18 series de hormigón fabricadas en la campaña experimental preliminar. En el eje de las abscisas se muestra la nomenclatura de dichas series mientras que en el eje de las ordenadas se tiene la trabajabilidad media en milímetros. Por otro lado, las letras A, N y C de la nomenclatura del eje de abscisas significan que las fibras han pasado por los baños de acetona, de NaOH y/o de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, respectivamente. Cabe mencionar que la consistencia media del hormigón también se recoge en la Tabla 4.3 para facilitar la lectura y comprensión de la Figura 4.9.

Tabla 4. 3 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental preliminar

SERIES	NOMENCLATURA	TRABAJABILIDAD MEDIA (mm)
1	REF	222,5
2	REF_A	227,5
3	REF_A_N	229,5
4	REF_C	230
5	REF_A_C	210
6	REF_A_N_C	240
7	T_0,1%_A	245
11	T_1%_A	255
15	T_10%_A	247,5
8	T_0,1%_A_N	240
12	T_1%_A_N	242,5
16	T_10%_A_N	249,5
9	T_0,1%_A_C	230
13	T_1%_A_C	238
17	T_10%_A_C	225
10	T_0,1%_A_N_C	245
14	T_1%_A_N_C	240
18	T_10%_A_N_C	268,5

Analizando la Figura 4.9, se observa que la mayoría de los hormigones presentan una consistencia fluida, cumpliendo con lo que se pretendía al diseñar la dosificación. De hecho, 16 de las series fabricadas presentan una trabajabilidad de entre 210 mm y 250 mm, a excepción de 2 de ellas. Estas 2 series corresponden a los hormigones T_1%_A y T_10%_A_N_C. Dichas series presentan consistencias medias de 255 mm y 268,5 mm, respectivamente, que corresponderían a mezclas de consistencias muy fluidas (> 250 mm).

Teniendo en cuenta que la incorporación de fibras debería reducir la fluidez de la mezcla, sería menos llamativo obtener series con consistencias inferiores a 200 mm, cuyas texturas serían más espesas, que obtener mezclas muy fluidas. Por tanto, lo único que explicaría la obtención de una consistencia muy fluida sería un error humano en la incorporación de la cantidad de agua o aditivo. No obstante, antes de descartar estas dos series como óptimas, sería interesante analizar sus resultados de resistencia a flexión y a compresión a 28 días ya que la adición de las fibras podría contrarrestar ese exceso de fluidez y el material no se vería comprometido.

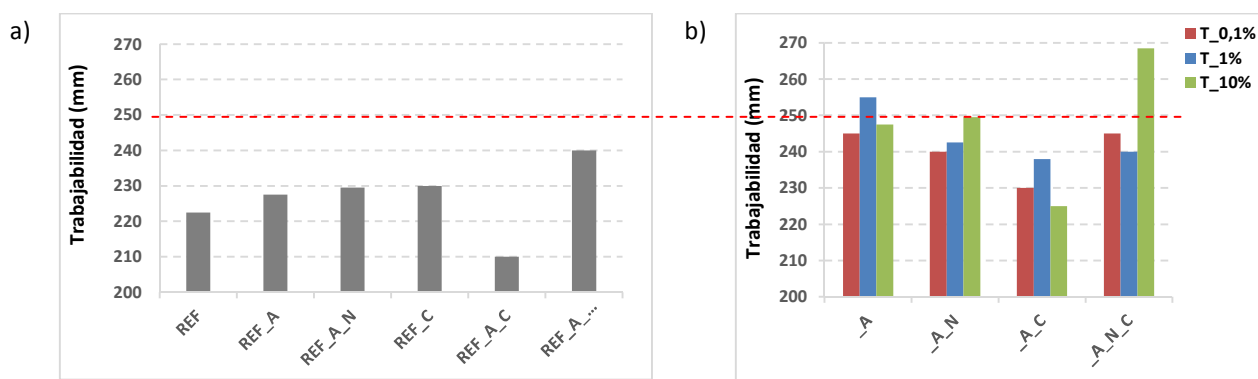


Figura 4.9 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental preliminar

4.4.2 Calorimetría

La calorimetría es un ensayo que permite determinar la velocidad de evolución del calor generado durante la hidratación del hormigón. En este apartado se pretende estudiar la influencia del silano de tipo TEOS en la cinética de la hidratación del hormigón. En la Figura 4.10 se muestra la calorimetría de cada una de las 18 series de hormigón fabricadas en la campaña experimental preliminar. En el eje de las abscisas se muestra el tiempo de duración del ensayo en horas mientras que en el eje de las ordenadas se tiene el flujo de calor normalizado en mW/g de cemento. Cabe mencionar que en la Figura 4.10 las calorimetrías se reparten en 4 gráficos diferentes agrupando aquellas cuyas fibras han recibido los mismos tratamientos. De esta manera, se pretende facilitar la comparación entre ellas.

Además, en el gráfico de la Figura 4.10.a) se añade la calorimetría de una pasta de cemento cuya relación a/c es de 0,3. La incorporación de esta calorimetría permite estudiar la influencia de ciertos factores en la evolución de las reacciones de hidratación de los 18 hormigones fabricados, cuya relación a/c es de 0,234. Entre estos factores se encuentra la finura del cemento, la relación a/c, el aditivo y las adiciones. Cabe recordar que mientras que la pasta de cemento solo está compuesta de cemento y agua, el hormigón utilizado en la presente

campana está compuesto de cemento, arena, agua, aditivo superplastificante, nanosílice y un 2% de fibras metálicas en volumen.

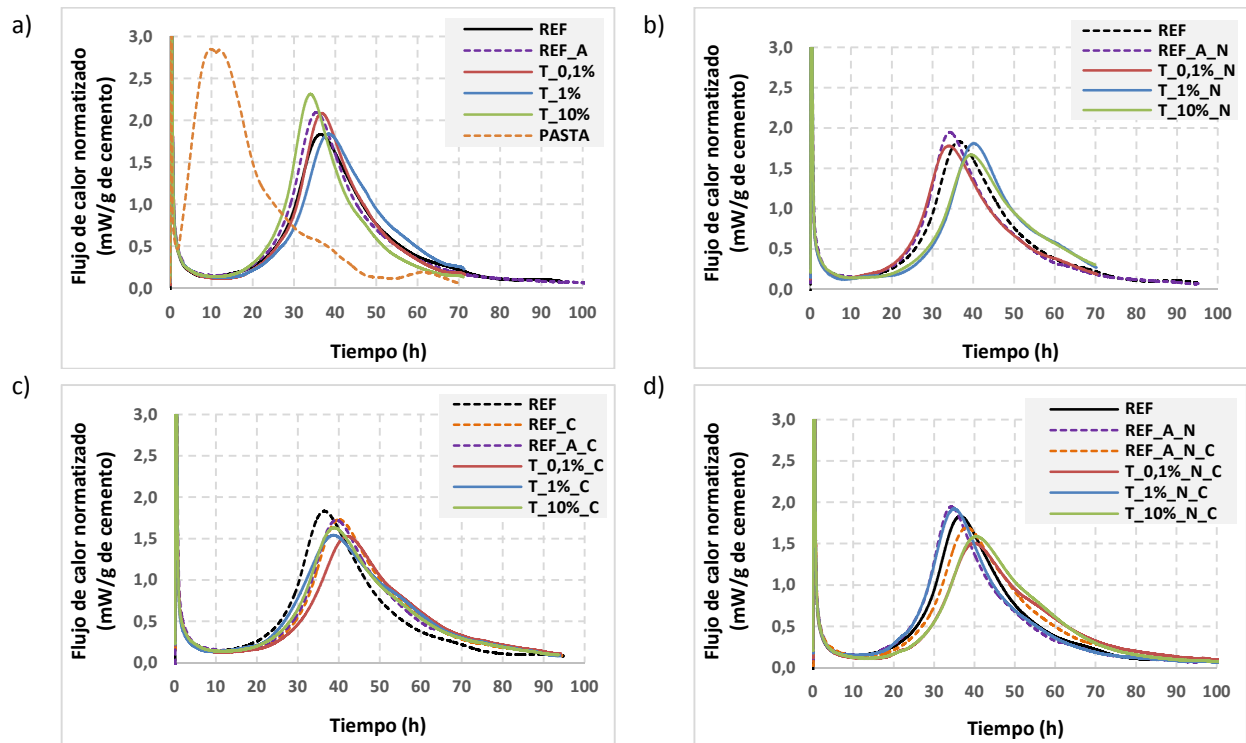


Figura 4.10 Calorimetría del HUARRFA en la campaña experimental preliminar

Analizando la Figura 4.10, se observa que todas las series fabricadas presentan su pico de hidratación entre las 30 y 40 horas después de haber empezado el ensayo. Estos picos difieren mucho de la máxima hidratación de la pasta de cemento, que puede interpretarse como el fraguado final, ya que tiene lugar tan solo a las 10 horas de haber sido mezclada (Figura 4.10.a). Este retraso tan grande en la hidratación del hormigón se contradice con el papel que deberían desarrollar los factores relacionados con la finura del material, mencionados en el párrafo anterior, que influyen en la evolución de la hidratación.

De hecho, la velocidad de hidratación aumenta con la finura del cemento ya que las partículas más finas tienen mayor superficie de contacto expuesta al agua y en consecuencia, la velocidad de hidratación es mayor, especialmente a edades tempranas. Además, al utilizar nanosílice en la mezcla con el fin de proporcionar finos, esta incorporación también aumentaría la velocidad de hidratación. Por tanto, parece extraño que los hormigones fabricados presenten una velocidad de hidratación tan lenta ya que en su composición hay mucho material fino. Teniendo esto en cuenta y observando que en todos los hormigones reforzados con fibra la hidratación comienza más tarde que la de la pasta, independientemente del tratamiento que hayan recibido sus fibras, se podría decir que la incorporación de fibra metálica en la matriz causaría cierto retraso en la hidratación.

Por otra parte, la relación a/c afecta significativamente en edades avanzadas ya que en estas edades la velocidad de hidratación disminuye y si la relación a/c es pequeña, el decrecimiento de la velocidad tiene lugar antes. Por tanto, las bajas relaciones a/c dan lugar a bajos grados de hidratación. Asimismo, la utilización de aditivos superplastificantes permite disminuir

significativamente el contenido de agua, acentuando aún más los bajos grados de hidratación del hormigón. Así pues, estos dos factores, especialmente el aditivo, también serían causantes del retraso de la hidratación y de la reducción del pico de intensidad que presentan los hormigones fabricados en esta campaña experimental respecto al de la pasta.

Volviendo al análisis de la Figura 4.10.a) y comparando solamente las calorimetrías de los hormigones fabricados, se observa que el hormigón T_10%_A presenta el pico más alto y un adelanto en la hidratación, teniendo ésta lugar a las 34 horas. Asimismo, se observa que la pendiente ascendente de su curva es más elevada que las del resto de calorimetrías.

Por otra parte, mientras que en la Figura 4.10.b) la calorimetría del hormigón T_0,1%_A_N presenta un adelanto en la hidratación (tiene lugar a las 34 horas frente a las 40 horas de las otras dos concentraciones), en la Figura 4.10.c) prácticamente no se observa diferencia entre la hidratación de las tres concentraciones (las tres tienen lugar a las 40 horas). De hecho, en este gráfico la calorimetría con mejor comportamiento es la del hormigón REF, observándose un adelanto en la hidratación (tiene lugar a las 36 horas). Ello podría indicar que el silano utilizado para funcionalizar la fibras retrasaría la hidratación. Por último, en la Figura 4.10.d) las calorimetrías de los hormigones T_0,1%_A_N_C y T_10%_A_N_C presentan picos más bajos de calor pero retardados en comparación con el hormigón T_1%_A_N_C que presenta la máxima hidratación a las 35 horas pero con un pico ligeramente más intenso.

Así pues, se observan dos tipos de retrasos en la hidratación del hormigón. Uno de ellos fruto de la incorporación del superplastificante y el otro, fruto de la incorporación del silano. Por otro lado, se observa más retraso en la hidratación de las series donde se utiliza fibra funcionalizada con una concentración de TEOS de 10% que en el resto de concentraciones. Además, cuando presentan un adelanto en la hidratación, el pico de calor es bastante alto en comparación con el resto de calorimetrías que aparecen en el gráfico, tal y como se puede observar en la Figura 4.10.a). Todo esto podría indicar que el punto de saturación se encuentra en la concentración de 1%, siendo la concentración de 10% excesiva. No obstante, antes de descartar como óptima esta concentración, se deben analizar los resultados obtenidos de los ensayos de flexión y compresión.

4.5 Ensayos de caracterización del HUARRFA

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en el laboratorio para los ensayos realizados al hormigón endurecido. Del análisis de los resultados quedarán determinadas las propiedades mecánicas de los hormigones diseñados en la campaña experimental preliminar. Además, aquellas series que presenten mejores resistencias serán clave para definir los parámetros óptimos de la etapa de funcionalización del tratamiento de las fibras de acero.

4.5.1 Ensayo de compresión

En la fase experimental se ensayaron a compresión cada una de las dos mitades de las probetas prismáticas ensayadas previamente a flexión, que fueron 5 por cada serie. Así pues, a la edad de 28 días, se ensayaron 10 mitades a compresión por cada serie. Cabe mencionar que al querer fabricar HUAR, la dosificación empleada para fabricarlos fue definida para obtener como mínimo resistencias a compresión de 120 MPa a 28 días. En la Tabla 4.4 se muestran los

resultados obtenidos del ensayo. Analizando estos resultados, se puede observar que todos los hormigones verifican la resistencia mínima deseada de 120 MPa a 28 días.

De los resultados obtenidos en el ensayo, se puede observar en la Tabla 4.4 que ni los hormigones fabricados con fibras de referencia (series 2-6) ni la gran mayoría de los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas (series 7-18), presentan mejores resistencias que la de referencia (serie 1). De hecho, en este ensayo solo presentan resistencias a compresión superiores a la de referencia los hormigones T_0,1%_A_C y T_1%_A_C. Las fibras de acero incorporadas en la matriz de estos dos hormigones no pasaron por la etapa de activación de la superficie de la fibra lo que en principio no habría facilitado la funcionalización. De ahí que llame la atención que sean las series que mejores resistencias presentan.

Tabla 4.4 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar

N.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)										MEDIA
	#1		#2		#3		#4		#5		
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
REF	168,3	146,1	135,4	136,4	154,0	158,2	154,5	153,9	163,0	167,2	153,7
REF_A	162,4	159,4	157,9	151,7	148,3	147,6	140,2	151,3	148,5	135,1	150,2
REF_A_N	148,4	142,6	151,8	150,4	154,0	148,3	147,5	140,8	146,1	138,8	146,9
REF_C	140,9	164,5	153,6	148,5	166,2	166,4	144,8	129,1	145,2	159,1	151,8
REF_A_C	132,5	144,6	131,0	131,5	152,6	148,8	116,6	140,4	156,6	163,1	141,8
REF_A_N_C	131,2	140,9	136,8	143,5	139,4	126,9	116,3	141,6	152,7	134,2	136,3
T_0,1%_A	140,6	161,9	152,2	147,3	150,5	152,6	149,4	131,6	147,7	151,5	148,5
T_1%_A	137,9	158,0	118,9	125,6	132,2	143,2	147,8	147,1	135,1	139,2	138,5
T_10%_A	146,9	142,2	142,3	142,8	142,0	146,3	143,9	151,4	158,6	140,5	145,7
T_0,1%_A_N	155,9	163,7	145,1	153,7	134,0	155,8	148,9	158,0	149,7	135,0	150,0
T_1%_A_N	138,3	142,2	155,6	140,7	161,5	171,0	152,8	161,4	162,4	123,4	150,9
T_10%_A_N	152,8	150,3	145,9	149,6	141,0	137,4	154,3	142,1	145,5	146,0	146,5
T_0,1%_A_C	150,5	154,2	160,8	158,7	155,5	157,5	144,3	160,5	161,0	159,7	156,3
T_1%_A_C	161,6	153,7	163,1	153,7	159,3	156,8	151,6	149,8	155,9	147,4	155,3
T_10%_A_C	154,3	159,8	151,6	148,4	161,5	147,8	132,0	130,5	153,7	160,0	150,0
T_0,1%_A_N_C	155,5	155,3	158,7	137,3	143,7	150,3	160,5	143,8	158,2	151,8	151,5
T_1%_A_N_C	142,0	155,8	133,5	137,7	134,0	145,4	139,6	154,2	153,0	133,8	142,9
T_10%_A_N_C	146,3	131,9	165,0	158,4	154,2	149,7	159,5	149,6	157,3	128,2	150,0

En la Figura 4.11 se muestra la resistencia a compresión de los diferentes hormigones fabricados. En el eje de las abscisas se presenta la nomenclatura de las series fabricadas mientras que en el eje de las ordenadas se tiene la resistencia a compresión en MPa. Además, incorpora la desviación estándar dando una visión más realista de cuanto puede alejarse el valor de la resistencia respecto a la media. Cabe recordar que las letras A, N y C de la nomenclatura del eje de abscisas significan que las fibras han pasado por los baños de acetona, de NaOH y/o de Ca(OH)₂, respectivamente.

Analizando la Figura 4.11, se confirma que solamente los hormigones T_0,1%_A_C y T_1%_A_C superaron el valor de la resistencia a compresión del hormigón de referencia en un 1,69% y 1,04%, respectivamente. Asimismo, se observa que en esta familia de series la resistencia aumenta cuando disminuye la concentración de TEOS. De hecho, el hormigón T_1%_A_C presenta menor aumento de resistencia que el hormigón T_0,1%_A_C. Esto daría fuerza a la idea de que la concentración de TEOS de 10% no sería la concentración más adecuada ya que

al ser la más alta de las tres estudiadas, se necesitaría mayor cantidad de silano lo que implicaría un mayor coste económico que no se vería compensado con la obtención de los resultados, ya que éstos son los que presentan peores resistencias. El hormigón T_10%_A_C presenta una resistencia un 2,41% inferior a la del hormigón REF.

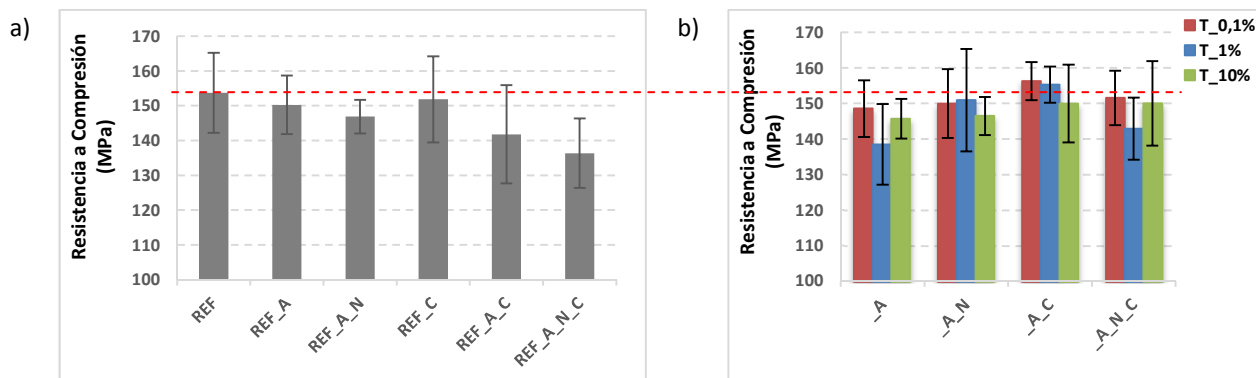


Figura 4.11 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar

Por otro lado, el hormigón que peor resistencia a compresión presenta es el REF_A_N_C al obtener un valor de resistencia a compresión un 11,32% inferior al valor del hormigón REF. En este caso, esta caída de la resistencia evidenciaría la necesidad de la funcionalización con TEOS ya que los resultados de los hormigones reforzados con fibras funcionalizadas son mejores, demostrando así la eficacia de esta etapa y una cierta dependencia entre las etapas del tratamiento. Todo esto hace pensar que la combinación de la etapa de funcionalización con las etapas de desengrase, activación e inmersión en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ podría garantizar la efectividad del tratamiento de la fibra de acero en la mayoría de los casos. Los hormigones que han pasado por las cuatro etapas del tratamiento no son los que mejores resistencias a compresión presentan pero sus valores son muy superiores a los 120 MPa.

4.5.2 Ensayo de flexión

Como ya se ha comentado, para la realización del ensayo a flexión se han utilizado 5 probetas por cada una de las 18 series, lo que resulta un total de 90 probetas que se ensayaron a la edad de 28 días. Las probetas son prismáticas de 40x40x160 mm. En la Figura 4.12 se muestra la resistencia a flexión de los diferentes hormigones fabricados. En el eje de las abscisas se muestra la nomenclatura de las series fabricadas mientras que en el eje de las ordenadas se tiene la resistencia a flexión en MPa, incorporando de nuevo en el gráfico la desviación estándar. Cabe recordar que las letras A, N y C de la nomenclatura del eje de abscisas significan que las fibras han pasado por los baños de acetona, de NaOH y/o de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, respectivamente. Por otra parte, debido a que en la Figura 4.12 solo se muestran las medias de la resistencia a flexión de cada serie, se decide adjuntar la Tabla 4.5 que además de las medias, recoge la resistencia de cada una de las probetas ensayadas.

De manera análoga a lo observado en el ensayo de compresión, se puede observar en la Tabla 4.5 que todos los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas (series 7-18) no presentan mejores resistencias que la de referencia (serie 1). De hecho, solo presentan resistencias a flexión superiores a la de referencia los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_1%_A_N_C y T_10%_A_N_C. Esto parece indicar que para que la funcionalización sea efectiva, la fibra de

acero debería pasar por las cuatro etapas del tratamiento, es decir, por el primer baño en acetona, por la inmersión en NaOH, por la funcionalización de la fibra con silano y por la última inmersión en Ca(OH)₂. Pasando por las cuatro etapas, parece ser que se conseguiría mejorar la resistencia a flexión de los HUARRFA.

Tabla 4.5 Resistencia a flexión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar

SERIES	NOMENCLATURA	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)					
		#1	#2	#3	#4	#5	MEDIA
1	REF	39,3	36,2	34,8	31,5	38,4	36,0
2	REF_A	35,7	39,6	35,0	40,1	30,7	36,2
3	REF_A_N	30,8	24,7	32,1	35,3	36,7	31,9
4	REF_C	42,2	30,2	33,2	28,5	30,4	32,9
5	REF_A_C	31,9	34,3	36,1	30,0	32,4	32,9
6	REF_A_N_C	29,0	36,9	32,3	22,6	29,7	30,1
7	T_0,1%	37,9	36,1	33,0	35,2	31,1	34,6
11	T_1%	28,1	27,6	29,7	28,2	21,1	26,9
15	T_10%	26,5	26,9	35,0	30,2	33,1	30,3
8	T_0,1%_N	34,1	36,6	34,1	33,6	37,8	35,2
12	T_1%_N	27,3	24,5	37,3	27,2	30,5	29,3
16	T_10%_N	32,9	32,7	31,9	32,0	28,0	31,5
9	T_0,1%_C	33,0	39,3	26,5	24,5	42,3	33,1
13	T_1%_C	30,7	40,7	33,7	32,7	42,3	36,0
17	T_10%_C	28,3	42,6	38,0	33,7	37,1	35,9
10	T_0,1%_N_C	47,5	32,6	33,9	33,4	34,8	36,4
14	T_1%_N_C	43,3	42,3	39,0	40,8	41,8	41,4
18	T_10%_N_C	43,7	45,6	33,9	31,5	36,6	38,3

En las series fabricadas con fibras de referencia (series 1-6), se observa que exceptuando el baño en acetona (serie 2), ninguna de las otras etapas mejoraría la resistencia a flexión. De hecho, cuantos más tratamientos se realizan a la fibra, ésta parece presentar un peor comportamiento mecánico. Ello podría significar que debido a la ausencia de silano, tanto el baño de NaOH como el baño de Ca(OH)₂ podrían estar deteriorando la superficie de la fibra. Lo que indicaría que el silano no funcionaría solamente como un agente acoplante sino que también sería un agente protector. En cambio, el baño de acetona no presentaría un peligro para la superficie de la fibra ya que su función es eliminar los residuos orgánicos sin ser corrosivo. Así, al estar libre de grasa e impurezas físicas, mejoraría la adherencia con la matriz y por ello, presentaría una resistencia mayor que la de referencia.

En la Figura 4.12 se corrobora que tan solo los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_1%_A_N_C y T_10%_A_N_C superaron el valor de la resistencia del hormigón de referencia en un 1,11%, 15,00% y 6,39%, respectivamente. Asimismo, se observa que este aumento de resistencia no es proporcional al aumento de la concentración de TEOS. De hecho, el hormigón T_10%_A_N_C presenta menor aumento de resistencia que el hormigón T_1%_A_N_C. Esto hace pensar que las concentraciones de 0,1% y 10% no serían las más apropiadas para próximas campañas experimentales por ser la primera de ellas insuficiente en la concentración y la segunda excesiva al ser la más costosa y no obtener con ella los mejores resultados.

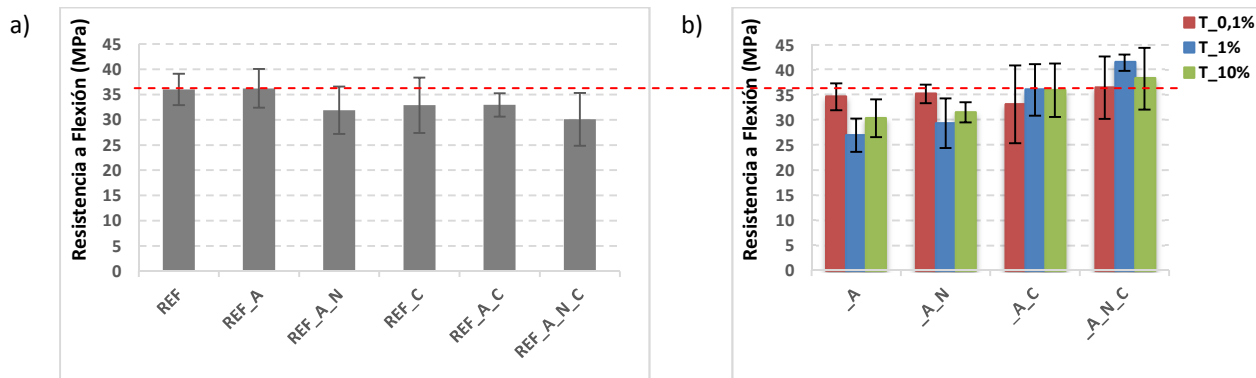


Figura 4.12 Resistencia a flexión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental preliminar

Por otro lado, la serie que peor resistencia a flexión presenta es la T_1%_A. Este hormigón obtuvo el valor más bajo, un 25,28% inferior que el valor de la resistencia del hormigón REF. Esta caída de la resistencia demostraría la necesidad de realizar las etapas de inmersión en NaOH e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La primera de ellas sería fundamental para activar la superficie de la fibra y propiciar que el revestimiento posterior con silano sea efectivo y mientras que la segunda sería necesaria para reaccionar con la capa de silano y aumentar la futura compatibilidad entre la fibra y la matriz cementicia.

4.6 Conclusiones

Como ya se ha comentado en infinidad de ocasiones, el presente trabajo pretende mejorar el comportamiento mecánico de los hormigones de ultra-alta resistencia reforzados con fibras de acero. Para ello, se debe aumentar la adherencia entre la fibra y la matriz. Así, la técnica utilizada en este trabajo para conseguir dicho incremento de la adherencia es la funcionalización de las fibras mediante un tratamiento con silano de tipo TEOS. Por ello, en esta primera campaña experimental es fundamental acotar los parámetros que afectan al resultado del tratamiento.

Para poder llevar a cabo la definición de estos parámetros de manera satisfactoria, se han estudiado 18 casos que se diferenciaban entre ellos en el tratamiento que recibían las fibras. Este tratamiento podía consistir en un desengrase con acetona, en una activación de la superficie de la fibra utilizando una disolución básica y/o en un baño en hidróxido de calcio para hacer reaccionar a la capa de silano y favorecer así la compatibilidad de la fibra con la matriz. Estos casos estudiados también se diferenciaban en la concentración de TEOS empleada para realizar la funcionalización. De hecho, la determinación de la concentración óptima ha sido uno de los parámetros más estudiado en esta campaña experimental.

Así pues, en el presente estudio se ha verificado que las mejores resistencias a flexión se obtienen reforzando los hormigones con fibras funcionalizadas que previamente hayan pasado por las etapas de desengrase e inmersión en hidróxido de sodio y posteriormente por la etapa de inmersión en hidróxido de calcio. Respecto a la concentración de TEOS, se ha conseguido descartar la concentración de 10% al observar que las resistencias obtenidas eran más bajas que las resistencias de los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas con una concentración de 1%. Además, gracias al análisis por SEM, se ha comprobado que la concentración de TEOS de 10% mostraba indicios de ser excesiva al observar que el

recubrimiento de silano presentaba un aspecto quebradizo. Cabe señalar que las decisiones se han tomado dando prioridad a los resultados de resistencia a flexión ya que al utilizar el refuerzo de fibras de acero, se busca principalmente mejorar la resistencia a flexión del material.

De cara a la próxima campaña experimental, aparte de conocer la importancia de combinar todas las etapas del tratamiento, se ha conseguido acotar el rango de la concentración de TEOS entre 0,1% y 1%. Con este nuevo rango también se reducirá el coste económico del tratamiento al necesitar menos cantidad de silano. Sin embargo, sería interesante introducir una nueva concentración perteneciente a este rango para acotar aún más si cabe la concentración óptima de silano. Así pues, en la campaña experimental específica se estudiará el comportamiento de los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C, comparando sus resultados con los del hormigón REF.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA CAMPAÑA ESPECÍFICA

5.1 Introducción

En este capítulo se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos en el desarrollo de la campaña experimental específica descrita en el tercer capítulo del presente trabajo. Mediante este análisis se pretende entender la respuesta y el comportamiento mecánico de los distintos HUARRFA fabricados en la segunda campaña experimental a partir de las variables registradas durante los ensayos.

Con objetivo de facilitar la comprensión del capítulo, por un lado se agrupan aquellos ensayos que se realizan al hormigón en estado fresco y por otro lado, aquellos ensayos que se realizan al hormigón endurecido.

5.1.1 Objetivos

El objetivo general de este capítulo es estudiar en profundidad el comportamiento mecánico del HUARRFA fabricado en el laboratorio para confirmar si el tratamiento previo de las fibras metálicas mejora la adherencia entre la fibra y la matriz. Por otro lado, durante la realización de dicho tratamiento previo se continúan optimizando parámetros, tales como la concentración de silano utilizada en la etapa de funcionalización, para que la metodología sea

lo más efectiva posible. Además, se modifica la dosificación de los hormigones para mejorar sus propiedades.

En base a ello, se definen los siguientes objetivos:

- Acotar aún más la variable de la concentración de TEOS para optimizar el tratamiento y reducir costes en futuros estudios a gran escala
- Estudiar las modificaciones realizadas en la dosificación de los hormigones para mejorar su consistencia
- Evaluar el comportamiento de los HUARRFA fabricados y determinar el caso óptimo.

Es importante recordar que los hormigones fabricados en esta campaña experimental son aquellos que presentaron mejores resistencias mecánicas en la campaña preliminar.

5.1.2 Organización del capítulo

Como ya se ha comentado, el presente capítulo se centra en el análisis de los resultados de los ensayos de caracterización del hormigón. Por ello, se decide estructurar dicho capítulo separando los ensayos realizados en estado fresco de los realizados en estado endurecido. Asimismo, se intenta seguir una estructura análoga a la del capítulo anterior para facilitar la transición y mostrar las semejanzas entre ambos capítulos de resultados.

Así pues, en el apartado 5.2 se analizan los ensayos realizados al hormigón en estado fresco y en el apartado 5.3 se analizan los resultados fruto de los ensayos a compresión, a flexotracción, Barcelona y *pull-out*.

5.2 Fabricación del hormigón

Antes de profundizar en este apartado, se considera oportuno comentar que en esta campaña experimental no se han realizado ensayos a la fibra tratada ya que al no haber realizado grandes modificaciones en las etapas del tratamiento, las fibras procedentes de dichas etapas deberían presentar las mismas características que en la campaña anterior. De hecho, en esta campaña experimental al sustituir la concentración de TEOS de 10% por una de 0,5%, los resultados de funcionalización deberían ser mejores ya que la concentración de 10% fue descartada al quedar demostrado que era excesiva. Además, la concentración de 0,5% está dentro del rango de 0,1% y 1%, que fue determinado como óptimo en la campaña anterior.

Volviendo al presente apartado de fabricación del hormigón, a continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados al hormigón cuando éste aún estaba en estado fresco. Dichos ensayos corresponden a la determinación de la trabajabilidad de todos los hormigones fabricados y a la realización de sus calorimetrías.

5.2.1 Trabajabilidad del HUARRFA

En esta campaña experimental se reduce el número de casos estudiados significativamente gracias al análisis de los resultados de la campaña experimental preliminar, que ha permitido descartar aquellos hormigones con peores resistencias mecánicas. Este descarte ha consistido en rechazar los hormigones cuyas fibras incorporadas daban peores resultados. Así, se

descartaron aquellos hormigones cuyas fibras no habían pasado por todas las etapas del tratamiento y la concentración de silano era del 10%.

Por otro lado, en esta nueva campaña experimental, se fabrican hormigones de referencia con diferentes volúmenes de fibras adicionados para estudiar cómo afecta la cantidad de fibra a los resultados de las resistencias. También se pretende estudiar si la mejora obtenida con los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas puede ser equivalente a la mejora obtenida con hormigones fabricados con mayor contenido de fibras de referencia. A continuación, se analiza cómo el volumen de fibra adicionado afecta a la trabajabilidad de la mezcla.

En la Figura 5.1 se muestra la trabajabilidad para cada una de las series fabricadas. En el eje de abscisas se muestra la nomenclatura de dichas series mientras que en el eje de las ordenadas se presenta la trabajabilidad media en milímetros. En esta campaña experimental, la dosificación de los hormigones fabricados también se diseñó para obtener una consistencia fluida, entre 200 mm y 250 mm de diámetro (NPCA, 2013). Cabe señalar que las medidas del diámetro alcanzado por el hormigón fresco durante el ensayo de consistencia también se recogen en la Tabla 5.1 con la intención de facilitar la lectura de la Figura 5.1. Claramente se observa que ninguna de las series presenta una consistencia fluida ya que todas las medias son inferiores a 200 mm, lo que significa que presentan una consistencia espesa.

Tabla 5.1 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental específica

SERIES	NOMENCLATURA	TRABAJABILIDAD MEDIA (mm)		
		MEDIDA #1 (mm)	MEDIDA #2 (mm)	MEDIA (mm)
1	REF_2%	192	190	191
2	REF_2,5%	151	131	141
3	REF_3%	120	120	120
4	T_0,1%_A_N_C	170	215	193
5	T_0,5%_A_N_C	190	200	195
6	T_1%_A_N_C	190	190	190

Analizando la Figura 5.1 se puede observar que los hormigones con diferente volumen de fibras incorporado presentan menor trabajabilidad cuanto mayor es dicho volumen. De hecho, se observa una pérdida importante de trabajabilidad en los hormigones con un contenido de fibras de 2,5% y 3% respecto al hormigón con un contenido de 2%. Dicha pérdida es de un 26,18% y un 37,17% para los hormigones REF_2,5% y REF_3%, respectivamente. Es importante mencionar que la influencia del volumen de fibras incorporado solamente se estudia en la fibra de referencia para evitar así que otras variables del tratamiento, como la concentración de silano, influyan en los resultados.

En las tres series restantes, que corresponden a los hormigones reforzados con fibras que han pasado por todas las etapas del tratamiento previo, se observan valores de trabajabilidad muy semejantes a los del hormigón REF_2%. Ello se debe a que las cuatro series comparten el mismo contenido de fibras incorporado. Mientras que en los hormigones T_0,1%_A_N_C y T_0,5%_A_N_C se observa un leve aumento de la trabajabilidad de un 1,05% y un 2,09%, respectivamente, en el hormigón T_1%_A_N_C se observa una leve pérdida de un 0,5%.

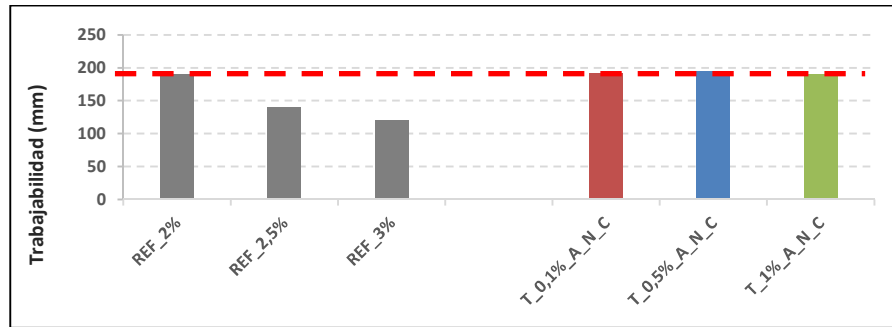


Figura 5.1 Trabajabilidad del HUARRFA en la campaña experimental específica

5.2.2 Calorimetría

A fin de estudiar la influencia del silano en la cinética de la hidratación del hormigón, en este apartado se analizan los resultados de las calorimetrías realizadas a los 6 hormigones fabricados, tal y como se observa en la Figura 5.2. En el eje de abscisas se muestra el tiempo de duración del ensayo en horas mientras que en el eje de ordenadas se tiene el flujo de calor normalizado en mW/g de cemento. Cabe mencionar que en la Figura 5.2 las calorimetrías se reparten en 2 gráficos diferentes agrupando en el primero de ellos las calorimetrías de los hormigones reforzados con fibras de referencia y en el segundo de ellos, las calorimetrías de los hormigones reforzados con fibras tratadas. Así, se pretende facilitar la comparación de la evolución de la hidratación entre estos dos tipos de hormigones.

En el gráfico de la Figura 5.2.a) se añade la calorimetría de una pasta de cemento cuya relación a/c es de 0,3 para estudiar la influencia de ciertos factores tales como la finura del cemento, la relación a/c, el aditivo y las adiciones en la evolución de la hidratación de los hormigones fabricados en la campaña específica, cuya relación a/c es de 0,2. Cabe señalar que mientras que la pasta de cemento solo está compuesta de cemento y agua, el hormigón utilizado en la presente campaña está compuesto de cemento, arena, agua, aditivo superplastificante, nanosilice, *filler* y un 2%, 2,5% o 3% de fibras metálicas en volumen. Se observa que los materiales empleados en esta fabricación fueron los mismos que en la campaña anterior a excepción de la adición de *filler* calizo, gracias al cual se pudo reducir la relación a/c.

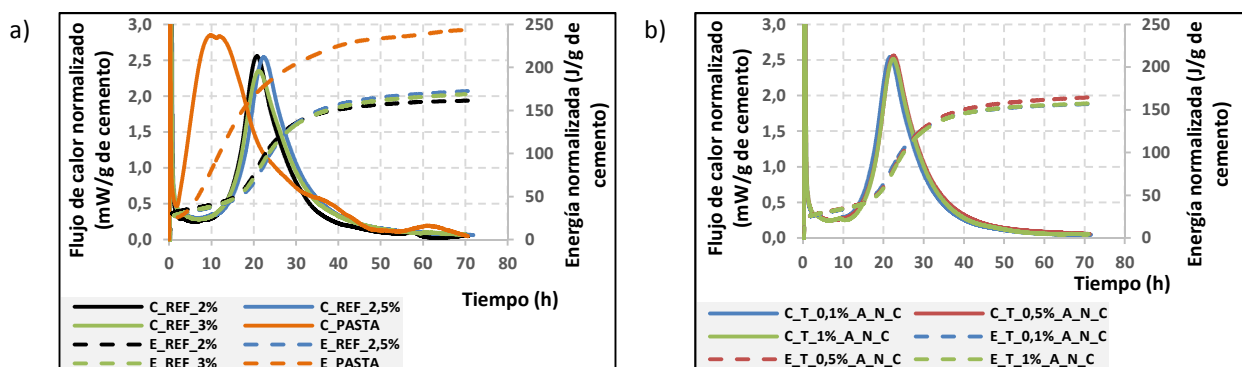


Figura 5.2 Calorimetría del HUARRFA en la campaña experimental específica

Analizando la Figura 5.2, se observa que todas las series fabricadas presentan su pico de hidratación entre las 20 y 23 horas después de haberse iniciado el ensayo. Estos picos continúan difiriendo de la máxima hidratación de la pasta de cemento, que tiene lugar a las 10

horas de haberse mezclado (Figura 5.2.a). Sin embargo, en comparación con las calorimetrías de la campaña experimental anterior, en esta segunda campaña se ha reducido significativamente el retraso de la hidratación. De hecho, el retraso ha disminuido prácticamente a la mitad ya que mientras que en la campaña preliminar el pico más intenso de la hidratación tenía lugar a las 30-40 horas, en la campaña específica tiene lugar a las 20-23 horas. Además, la intensidad del pico en la segunda campaña es mayor (2,5 mW/g de cemento frente a 1,5-2 mW/g de cemento en la primera campaña). Esto se debería a la utilización de *filler* que, además de permitir la reducción de la relación a/c, mejora el empaquetamiento en el esqueleto granular del cemento y actúa como núcleo de cristalización para la precipitación de portlandita, acelerando así la hidratación de los granos de cemento.

Por otro lado, se conoce que la finura de los materiales aumenta la velocidad de hidratación debido a que las partículas más finas tienen mayor superficie de contacto expuesta al agua. Así pues, al tratarse también de hormigones con altas cantidades de material fino, la velocidad de hidratación debería ser mayor. Como esto no ocurre, el retraso podría deberse al simple hecho de incorporar fibra de acero en la matriz cementicia. Además, una relación a/c baja y la incorporación de aditivos superplastificantes provocarían que el decrecimiento de la velocidad de hidratación sucediera antes, lo que daría lugar a bajos grados de hidratación del hormigón. Por tanto, estos dos factores también serían causantes del retraso de la hidratación del hormigón.

Retomando el tema de la influencia del silano en la hidratación, no se observa prácticamente ninguna diferencia ni en la curva de calorimetría ni en la curva de energía entre los hormigones con fibras de referencia (Figura 5.2.a) y los hormigones con fibras tratadas (Figura 5.2.b). Solamente se observa una pequeña disminución de la intensidad del pico de hidratación del hormigón REF_3% que podría deberse a la gran cantidad de fibras por unidad de volumen del material. Así pues, a excepción del hormigón REF_3%, no se aprecian diferencias significativas entre la hidratación de los hormigones reforzados con fibras de referencia y la hidratación de los hormigones reforzados con fibras tratadas. Esto hace pensar que para concentraciones de hasta un 1%, el silano no influiría en la evolución de la hidratación del HUARRFA.

A diferencia de la campaña preliminar, en esta segunda campaña el retraso en la hidratación del hormigón se debería principalmente a la incorporación del superplastificante ya que parece ser que el silano no influiría. Asimismo, como todos los hormigones muestran curvas muy semejantes, sería muy difícil determinar qué hormigón presentaría la velocidad de hidratación más apropiada para las características de los elementos que se fabricarían con este tipo de hormigón. Así pues, todo esto deja entrever que el ensayo de calorimetría en esta campaña experimental no sería concluyente para descartar series y determinar la óptima.

5.3 Caracterización del HUARRFA

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en el laboratorio para los ensayos realizados al hormigón endurecido. Del análisis de los resultados quedarán determinadas las propiedades mecánicas de los hormigones diseñados en la campaña experimental específica. Además, aquellas series que presenten mejores resistencias serán clave para futuras investigaciones.

5.3.1 Ensayo de compresión

En la fase experimental se ensayaron las probetas a compresión para todas las tipologías de hormigones fabricados, es decir, tanto los hormigones reforzados con fibras de referencia como los hormigones reforzados con fibras tratadas. De hecho, se ensayaron a compresión cada una de las dos mitades de las probetas prismáticas ensayadas previamente a flexotracción, que fueron 8 por cada serie. Así pues, a la edad de 28 días, se ensayaron 16 mitades a compresión por cada serie. Cabe mencionar que al igual que en la campaña preliminar, los hormigones fueron fabricados para obtener como mínimo resistencias a compresión de 120 MPa a 28 días. En la Tabla 5.2 se recogen los resultados obtenidos del ensayo que muestran resistencias superiores a 120 MPa a 28 días.

Tabla 5.2 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental específica

#	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)											
	REF_2%		REF_2,5%		REF_3%		T_0,1%_A_N_C		T_0,5%_A_N_C		T_1%_A_N_C	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
#1	184,14	172,71	177,21	176,90	183,79	175,39	169,11	164,06	167,96	165,01	165,39	166,91
#2	154,85	165,12	163,90	176,22	200,86	185,01	161,70	173,41	182,57	173,09	166,01	159,54
#3	179,70	170,52	172,20	179,58	189,60	187,73	166,96	164,49	171,81	173,93	170,73	163,71
#4	164,74	179,61	187,49	184,91	191,32	181,79	166,61	159,14	168,86	178,54	153,20	162,38
#5	177,60	173,48	187,95	180,13	174,68	175,05	164,19	161,58	171,33	173,50	165,98	154,92
#6	170,83	173,55	184,96	172,45	171,96	184,21	165,71	151,07	183,68	167,53	162,24	163,06
#7	174,33	175,31	185,01	187,46	175,19	179,29	168,30	154,13	167,20	165,21	166,46	172,76
#8	170,10	171,74	178,53	176,53	181,18	183,21	162,03	169,91	168,31	173,16	155,49	165,71
MEDIA	172,40		179,46		182,52		163,90		171,98		163,41	
C.V. (%)	6,69		6,46		7,28		5,53		5,46		5,25	

Tras un análisis inicial de los resultados recogidos en la Tabla 5.2, se observa que todos los hormigones fabricados con fibras tratadas presentan valores de resistencias a compresión inferiores al del hormigón REF_2%. Al compartir la misma cantidad de fibras en volumen, esta diferencia en los resultados indicaría que la funcionalización no mejora la resistencia a compresión de los HUARRFA. No obstante, estos resultados no causan sorpresa ya que en la campaña preliminar los hormigones reforzados con fibras que habían pasado por las cuatro etapas del tratamiento también presentaban este comportamiento.

En la Figura 5.3 se muestra la resistencia a compresión de los diferentes hormigones fabricados. En el eje de las abscisas se presenta la nomenclatura de las 6 series fabricadas mientras que en el eje de las ordenadas se tiene la resistencia a compresión en MPa. Analizando dicha Figura, que también muestra la desviación estándar, se confirma que los hormigones reforzados con fibras tratadas presentan peores resistencias a compresión que el hormigón de referencia. De hecho, las resistencias de los hormigones T_0,1%_A_N_C y T_1%_A_N_C son un 4,93% y un 5,21% inferiores al valor del hormigón REF_2%, respectivamente. La resistencia del hormigón T_0,5%_A_N_C también es menor al valor del hormigón REF_2% aunque en este caso la diferencia es menos llamativa, solamente un 0,24% inferior. Este hecho indicaría que la concentración de TEOS de 0,5% sería la más aconsejable para seguir investigando la influencia del silano en la mejora de la resistencia a compresión.

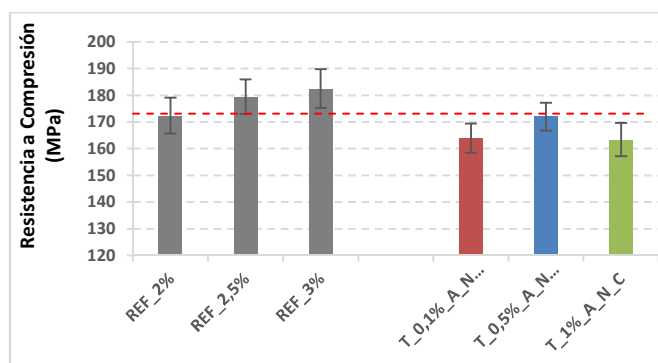


Figura 5.3 Resistencia a compresión del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental específica

Asimismo, se observa que la resistencia a compresión aumenta cuanto mayor es el volumen de fibras de referencia incorporado a la matriz cementicia. Prueba de ello es el aumento de las resistencias de los hormigones REF_2,5% y REF_3% en un 4,10% y un 5,87%, respectivamente, en relación al valor del hormigón REF_2%. Dicho aumento de la resistencia a compresión se debe a la gran cantidad de fibras por unidad de volumen que presentan estos hormigones. De hecho, este fenómeno se conoce como efecto de confinamiento ya que cuando el hormigón es sometido a confinamiento, experimenta un incremento en resistencia y capacidad de deformación.

Por otro lado, después de realizar el ensayo *pull-out* a 3 y 7 días, cuyos resultados se analizarán más adelante, las probetas ensayadas se aprovecharon para ensayarlas también a compresión a 3 y 7 días. Con ello se pretendía estudiar la evolución de la resistencia a compresión de los hormigones con 2% de fibras en volumen. En la Tabla 5.3, que recoge los datos de estos ensayos, se observa que el hormigón REF_2% presenta las mayores resistencias.

Tabla 5.3 Resistencia a compresión del HUARRFA a 3 y 7 días en la campaña experimental específica

#	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)							
	REF_2%		T_0,1%_A_N_C		T_0,5%_A_N_C		T_1%_A_N_C	
	3 días	7 días	3 días	7 días	3 días	7 días	3 días	7 días
#1	110,06	117,81	107,20	101,64	97,99	96,41	68,04	102,83
#2	88,19	126,26	99,45	96,23	83,40	112,06	72,43	112,27
#3	93,46	141,05	91,93	117,64	98,94	104,31	78,68	110,96
#4	90,39	118,79	89,46	120,75	81,60	96,44	82,26	75,41
#5	87,94	152,87	80,80	105,33	76,78	103,44	76,94	98,09
#6	94,01	122,94	69,58	109,59	85,28	106,06	92,83	96,92
MEDIA	94,01	129,95	89,73	108,53	87,33	103,12	78,53	99,41
C.V. (%)	7,55	12,80	12,18	8,59	8,29	5,47	7,83	12,21

En la Figura 5.4 se muestra la resistencia a compresión de los HUARRFA a la edad de los 3, 7 y 28 días. En el eje de las abscisas se presenta la edad de ensayo en días mientras que en el eje de las ordenadas se tiene la resistencia a compresión en MPa. A través del análisis comparativo de estos datos, se confirma que el hormigón REF_2% es el que mayores resistencias presenta en cualquiera de las edades ensayadas.

Por otro lado, en los hormigones reforzados con fibras tratadas a las edades de 3 y 7 días, se observa una disminución de la resistencia cuanto mayor es la concentración de silano. Además, a la edad de 7 días, se observa una gran diferencia en los valores de resistencia entre

el hormigón de referencia y los hormigones reforzados con fibras tratadas. De hecho, las resistencias de los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C son un 16,48%, un 20,65% y un 23,50% inferiores, respectivamente. No obstante, esta tendencia no se observa a la edad de 28 días, ya que como se ha comentado previamente, el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta una resistencia levemente menor que la del hormigón de referencia pero mayor que la de los otros dos hormigones T_0,1%_A_N_C y T_1%_A_N_C. La resistencia del hormigón T_0,5%_A_N_C es tan semejante a la del hormigón REF_2%, que sería el hormigón más apropiado para continuar con las investigaciones.

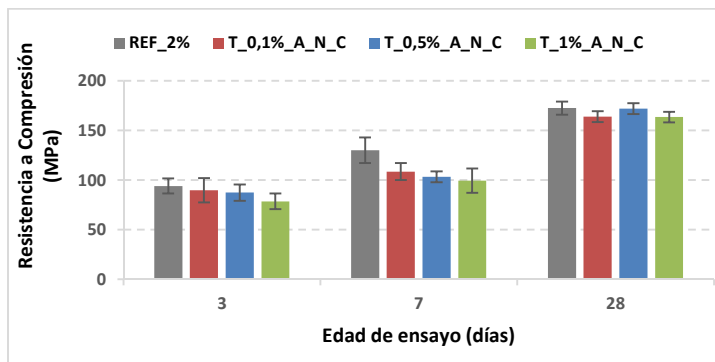


Figura 5.4 Comparativa de la resistencia a compresión del HUARRFA a 3, 7 y 28 días en la campaña experimental específica

5.3.2 Ensayo de flexotracción

Para la realización del ensayo a flexión se han utilizado 8 probetas prismáticas de 40x40x160mm para cada serie, lo que resulta en un total de 48 probetas. Los resultados de este ensayo se han representado mediante curvas tensión-energía-ancho de fisura. En la Figura 5.5 se muestran los resultados obtenidos de los hormigones reforzados con fibras de referencia, mientras que en la Figura 5.6 se muestran los resultados obtenidos de los hormigones reforzados con fibras tratadas. Se realiza esta diferenciación para analizar de manera más exhaustiva dichos resultados, estudiando por separado la influencia de la cuantía de fibras empleada en la fabricación del hormigón de la influencia de la concentración de silano. En el eje de las abscisas se presenta el ancho de fisura en milímetros mientras que en el eje principal de las ordenadas se tiene la tensión en MPa y en el eje secundario de las ordenadas se tiene la energía acumulada en kJ.

5.3.2.1 Influencia de la cuantía de fibras

La resistencia a flexión de la viga está relacionada con el número de fibras que cosen la fisura y este número, a su vez, depende de la cuantía de fibras incorporada al hormigón. Por ello, resulta interesante conocer la influencia de dicha cuantía y saber cuánto aumenta la resistencia con la cantidad de fibras incorporada. Así, en la Figura 5.5.a) y b) se muestran los resultados obtenidos para las diferentes cantidades de fibra.

Analizando la Figura 5.5, se observa que la tensión resistida por el hormigón es mayor cuanto más elevado es el contenido de fibras incorporado. La diferencia en la resistencia para los tres casos es claramente visible, mostrando que el hormigón REF_2% presenta la menor resistencia. De hecho, la resistencia máxima del hormigón REF_2,5% se ha visto incrementada

en un 35,57% respecto a la obtenida con el hormigón REF_2%. Asimismo, la resistencia máxima correspondiente al hormigón REF_3% resulta ser un 66,83% mayor respecto a la obtenida para la menor cuantía.

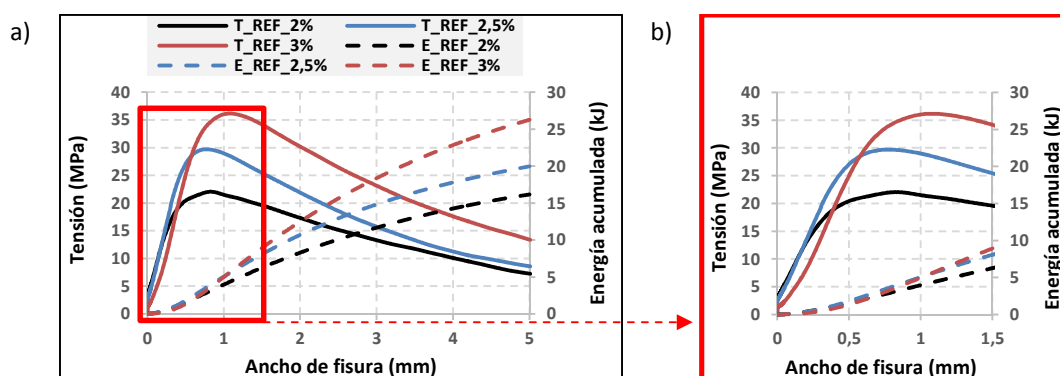


Figura 5.5 Tensión por flexión y energía acumulada de los hormigones reforzados con fibras de referencia a 28 días en la campaña experimental específica

Por otro lado, se observa que el comportamiento en la zona elástica es similar para los tres hormigones, pero se aprecian diferencias importantes en el comportamiento postfisuración. Estas diferencias son resultado de la cantidad de fibras incorporada ya que a medida que el número de fibras aumenta, también parece ser que lo hace la resistencia residual. En la Tabla 5.4 se presentan los valores de tensión correspondientes a los anchos de fisura comprendidos entre los 0,5 y 3,5 mm con un intervalo de 0,5 mm. Para un valor de referencia de 0,5 mm, los hormigones REF_2,5% y REF_3% presentan un incremento promedio de la resistencia de un 31,89% y un 20,42%, respecto a la obtenida en el hormigón de REF_2%, respectivamente. Para el valor de referencia de 3,5 mm, estos valores de incremento de resistencia respecto al hormigón REF_2% son un 13,30% y un 71,44%, respectivamente.

Tabla 5.4 Flexotracción: Tensiones asociadas a los anchos de fisura de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm de los hormigones de referencia

ANCHO DE FISURA	TENSIONES (MPa)		
	REF_2%	REF_2,5%	REF_3%
Máx.	22,55	30,57	37,62
w=0,5 mm	20,32	26,80	24,47
w=1,5 mm	19,64	25,51	34,24
w=2,5 mm	15,17	18,56	26,44
w=3,5 mm	11,73	13,29	20,11

En la Figura 5.5 también se muestra como aumenta la energía necesaria para provocar la rotura de la probeta según el volumen de fibras. Se observa que la energía para la rotura del hormigón REF_3% es la más elevada de las tres. Este valor es un 62,46% mayor que la energía necesaria para el hormigón REF_2% y un 31,54% mayor que la necesaria para el hormigón REF_2,5%.

Estos incrementos en resistencia y energía están directamente relacionados con la cuantía de fibras. Un mayor contenido causa que un mayor número de fibras cosan la fisura generada durante el ensayo. Así pues, el aumento de la cuantía de fibras permite alcanzar mayores resistencias y resistir mayores solicitaciones. No obstante, tal y como se ha comentado en el

capítulo 2 del presente trabajo, la cantidad de fibras incorporada no es el único factor que influye en el incremento de la resistencia. De hecho, la orientación de la fibra en el interior del hormigón también es una variable determinante para obtener altas resistencias.

5.3.2.2 Influencia de la concentración de silano

La campaña experimental específica también estudia el comportamiento del hormigón con fibras de referencia y fibras tratadas con diferentes concentraciones de silano para observar si la respuesta producida frente a sollicitaciones de la misma naturaleza es diferente. Para conocer dichos comportamientos se analizan los resultados obtenidos, que se muestran en la Figura 5.6, comparando la resistencia que soportan las probetas con fibras de referencia o fibras funcionalizadas.

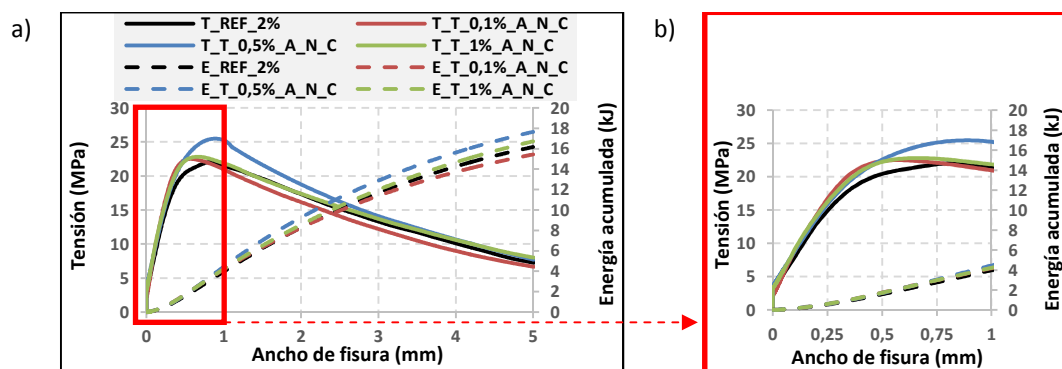


Figura 5.6 Tensión por flexión y energía acumulada de los hormigones reforzados con fibras tratadas a 28 días en la campaña experimental específica

En la fase elástica de la curva, se observa un comportamiento similar para los dos tipos de fibra. Sin embargo, la resistencia tras la aparición de la primera fisura genera un cambio en el régimen postfisuración. Por un lado, se observa que los hormigones reforzados con fibras tratadas presentan valores de tensión máxima superiores al del hormigón con fibra de referencia. De hecho, las resistencias máximas correspondientes a los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C resultan ser un 2,08%, un 15,92% y un 3,24% mayores respecto a la obtenida con el hormigón REF_2%, respectivamente.

Por otro lado, los valores de resistencia residual de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C son mayores que los del hormigón REF_2% para cualquiera de los anchos de fisura medido. En la Tabla 5.5 se presentan los valores de tensión correspondientes a los anchos de fisura comprendidos entre los 0,5 y 3,5 mm con un intervalo de 0,5 mm.

Tabla 5.5 Flexotracción: Tensiones asociadas a los anchos de fisura de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm de los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas

ANCHO DE FISURA	TENSIONES (MPa)			
	REF_2%	T_0,1%_A_N_C	T_0,5%_A_N_C	T_1%_A_N_C
Máx.	22,55	23,02	26,14	23,28
w=0,5 mm	20,32	22,31	22,41	22,14
w=1,5 mm	19,64	18,43	21,69	19,54
w=2,5 mm	15,17	14,08	16,25	15,44
w=3,5 mm	11,73	10,50	12,35	12,11

Los valores de la Tabla 5.5 son indicativos del notable aumento en la resistencia que la adición de fibras tratadas supone para un determinado valor del ancho de fisura. Observando el valor de referencia de 0,5 mm para los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C, el incremento promedio de la resistencia respecto a la obtenida en el hormigón de REF_2% es un 10,29% y un 8,96%, respectivamente. Para el valor de referencia de 3,5 mm, estos valores de incremento de resistencia respecto al hormigón REF_2% son un 5,29% y un 3,24%, respectivamente.

Retomando el análisis de la Figura 5.6, los valores de energía representados muestran que la energía necesaria para la rotura de las probetas de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C es mayor que la del hormigón REF_2%. De hecho, los valores de la energía para la rotura de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C son un 9,15% y un 3,40% mayores que la energía necesaria para el hormigón REF_2%.

Así pues, se observa que el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta los valores de resistencia residuales y de energía mayores. Esto indicaría que las fibras funcionalizadas con una concentración de TEOS de 0,5% serían las más adecuadas para mejorar la resistencia a flexotracción de los HUARRFA estudiados en el presente trabajo. Además, la concentración de 0,5% sería un punto de saturación de la funcionalización ya que para mayores concentraciones no se han obtenido mejores resistencias.

5.3.2.3 Comparativa de las resistencias residuales

Comparando los valores de la Tabla 5.4 y la Tabla 5.5, se observa que la resistencia residual de los hormigones fabricados con fibras funcionalizadas no equivale a la resistencia de los hormigones fabricados con una mayor cuantía de fibras de referencia para ningún ancho de fisura medido. Para un valor de referencia de 3,5 mm, el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta unas resistencias residuales de un 7,07% y un 38,59% inferiores a las obtenidas en los hormigones de REF_2,5% y REF_3%, respectivamente.

5.3.3 Ensayo Barcelona

Como ya se ha comentado en el capítulo 2 del presente trabajo, el ensayo Barcelona es una alternativa a los ensayos de flexotracción que permite determinar la resistencia a fisuración, la tenacidad y la resistencia residual a tracción de los hormigones reforzados con fibras. Asimismo, este ensayo reduce la dispersión de los resultados al presentar una superficie específica de rotura mayor.

Para la realización del ensayo Barcelona se han utilizado 6 probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura para cada serie, lo que resulta en un total de 36 probetas. Todas las probetas se han fabricado empleando la misma dosificación de hormigón, diferenciándose únicamente en el tipo de fibra incorporada, y se han ensayado a una edad de 28 días. A continuación, se analizan los resultados obtenidos del ensayo Barcelona, que se han representado mediante curvas tensión-energía-ancho de fisura, tal y como se muestra en la Figura 5.7. En el eje de las abscisas se presenta el ancho de fisura en milímetros mientras que en el eje principal de las ordenadas se tiene la tensión en MPa y en el eje secundario de las ordenadas se tiene la energía acumulada en J.

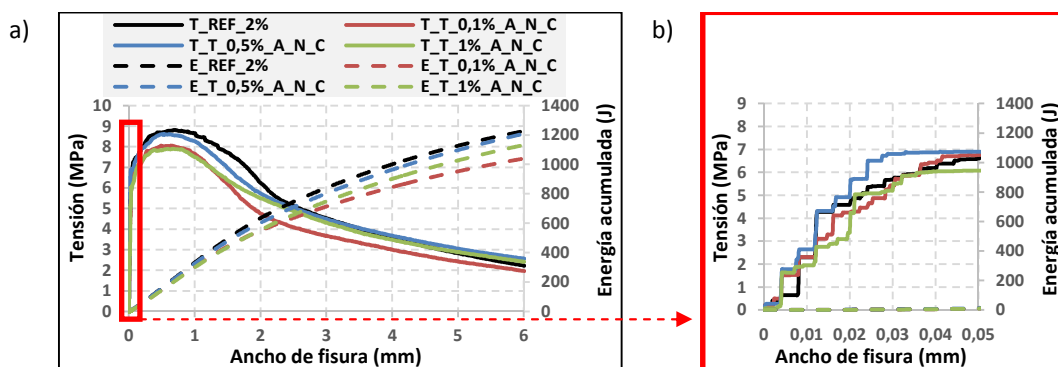


Figura 5.7 Tensión a tracción y energía acumulada del HUARRFA a 28 días en la campaña experimental específica

En la fase elástica de la curva, se observa un comportamiento similar en todos los hormigones. El hormigón REF_2% es el que más tarda en alcanzar la zona plástica con una resistencia de fisuración de 3,57 MPa, seguido del hormigón T_0,5%_A_N_C con una resistencia de fisuración de 3,19 MPa. Sin embargo, la resistencia tras la aparición de la primera fisura genera un cambio en el régimen postfisuración. Por un lado, se observa que los hormigones reforzados con fibras tratadas presentan valores de tensión máxima inferiores al del hormigón con fibra de referencia. De hecho, las resistencias máximas correspondientes a los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C resultan ser un 9,17%, un 2,68% y un 10,85% inferiores respecto a la obtenida con el hormigón REF_2%, respectivamente.

Por otro lado, los valores de resistencia residual del hormigón REF_2% son mayores que los de los hormigones reforzados con fibras tratadas para prácticamente todos los anchos de fisura medidos. En la Tabla 5.6 se presentan los valores de tensión correspondientes a los anchos de fisura comprendidos entre los 0,5 y 6,0 mm.

Tabla 5.6 Ensayo Barcelona: Tensiones asociadas a los anchos de fisura de 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 4 mm y 6 mm

ANCHO DE FISURA	TENSIONES (MPa)			
	REF_2%	T_0,1%_A_N_C	T_0,5%_A_N_C	T_1%_A_N_C
Fisuración	3,57	3,28	3,19	2,55
Máx.	8,94	8,12	8,70	7,97
w=0,5 mm	8,69	8,05	8,60	7,83
w=1,0 mm	8,66	7,67	8,28	7,51
w=1,5 mm	7,72	6,22	7,00	6,40
w=2,0 mm	6,27	4,77	5,75	5,50
w=2,5 mm	5,13	4,08	5,03	4,89
w=4,0 mm	3,58	3,00	3,68	3,48
w=6,0 mm	2,23	1,96	2,57	2,41

Los valores de la Tabla 5.6 muestran un aumento en la resistencia residual de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C para valores del ancho de fisura a partir de 4 mm y 6 mm, respectivamente. Observando el valor de referencia de 2,0 mm para los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C, la pérdida de resistencia respecto a la obtenida en el hormigón REF_2% es un 8,29% y un 12,28%, respectivamente. En cambio, para el valor de referencia de 6,0 mm, para estos mismos hormigones se observa un incremento promedio de la resistencia respecto al hormigón REF_2% de un 15,25% y un 8,07%, respectivamente.

Volviendo al análisis de la Figura 5.7, los valores de energía representados muestran que la energía necesaria para la rotura de las probetas del hormigón REF_2% es mayor que la de los hormigones reforzados con fibras tratadas. De hecho, los valores de la energía para la rotura de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C son un 1,42% y un 7,66% inferiores que la energía necesaria para el hormigón REF_2%.

Así pues, se observa que el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta los valores de resistencia residuales mayores a partir de anchos de fisura de 4 mm mientras que el hormigón REF_2% presenta los valores de energía más grandes. Para determinar qué hormigón sería el más adecuado en base a los resultados de este ensayo, se debería dar más importancia al aumento de la resistencia residual del hormigón T_0,5%_A_N_C ya que el incremento de dicha resistencia es mayor que la diferencia de energías entre los dos hormigones.

Es importante mencionar que para poder comparar los resultados obtenidos del ensayo Barcelona con los del ensayo de flexotracción, se debería hallar una relación entre ambos ensayos a partir de un modelo de correlación bien justificado. Este modelo permitiría el cálculo estimado de la respuesta del material en flexotracción en función de parámetros pertenecientes al ensayo Barcelona.

5.3.4 Ensayo pull-out

Este ensayo es el más usado para obtener información sobre la región de la interfase fibra-matriz de los HRF. Por tanto, teniendo en cuenta que en este trabajo se pretende aumentar la adherencia entre la fibra y la matriz mediante la funcionalización de las fibras con silanos para incrementar así la respuesta mecánica a tracción del hormigón, el ensayo de *pull-out* resultaría ser el más adecuado para obtener dicha información. De hecho, los resultados de este ensayo serían fundamentales para conocer la efectividad del tratamiento con silanos realizado a las fibras.

Así pues, para este último ensayo de la campaña experimental específica, se han ensayado 6 probetas prismáticas de 40x40x75 mm a edades de 3, 7, 28 y 90 días para cada serie, lo que resulta en un total de 144 probetas. Los resultados de este ensayo también se han representado mediante curvas tensión-energía-ancho de fisura. En la Figura 5.8 se muestran los resultados obtenidos separando las variables edad y concentración para facilitar el análisis de los gráficos. Por ello, los resultados se agrupan en función de la edad ensayada. En el eje de las abscisas se presenta el ancho de fisura en milímetros mientras que en el eje principal de las ordenadas se tiene la tensión en MPa y en el eje secundario de las ordenadas se tiene la energía acumulada en J.

Analizando la Figura 5.8, se observa que a la edad de 3 días el hormigón REF_2% presenta un incremento de la resistencia máxima al arrancamiento de un 20,00% y un 10,06% respecto a los hormigones T_0,1%_A_N_C y T_0,5%_A_N_C, respectivamente. Además, a la edad de 7 días los resultados obtenidos son bastante semejantes a los obtenidos a la edad de 3 días lo que podría indicar que las reacciones puzolánicas aún no se han completado.

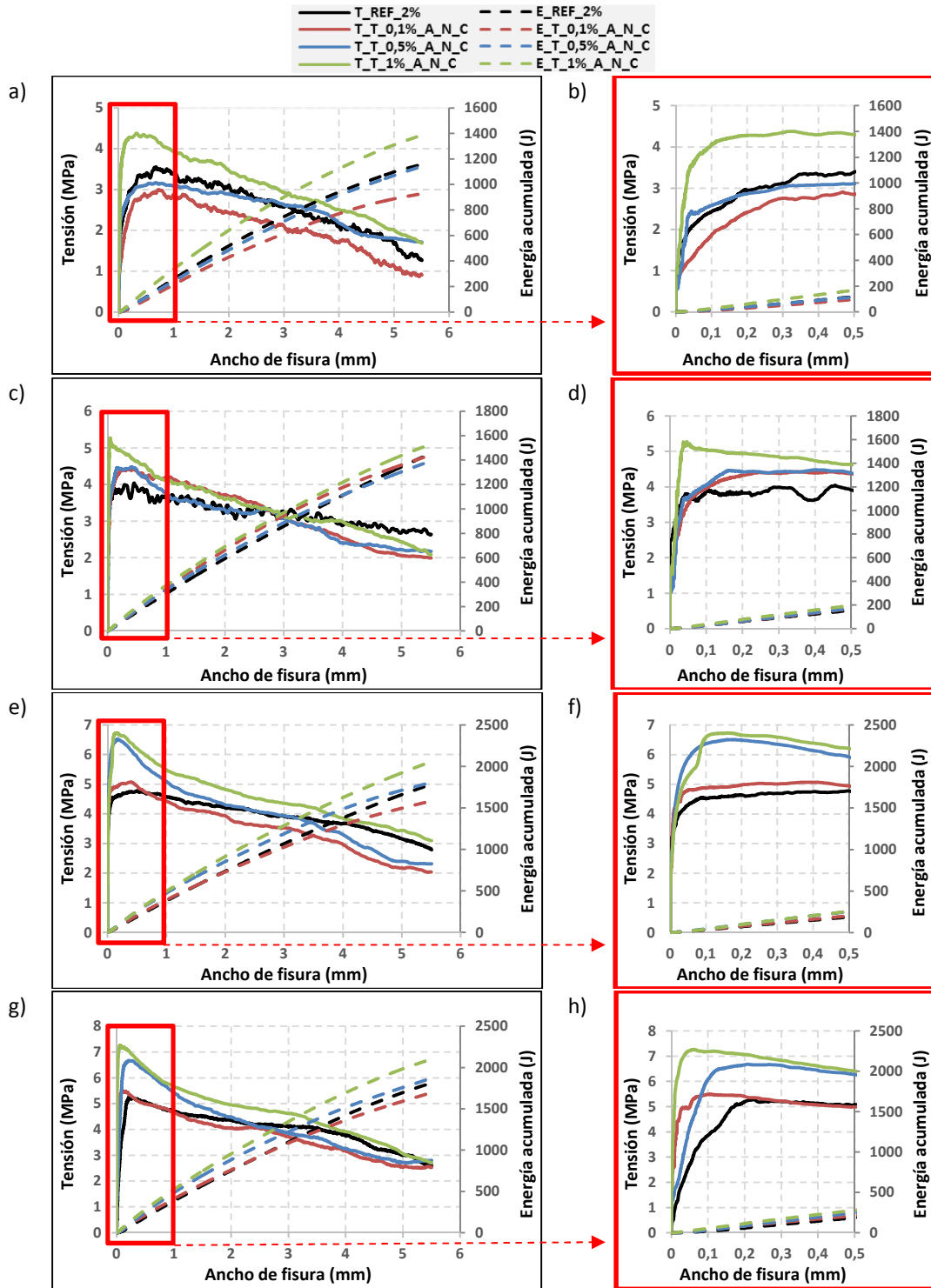


Figura 5.8 Curvas tensión-energía-ancho de fisura a la edad de: a) y b) 3 días, c) y d) 7 días, e) y f) 28 días, g) y h) 90 días

En cambio, a la edad de 28 días todos los hormigones con fibras tratadas presentan mejores resistencias que el hormigón REF_2%. De hecho, los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C presentan un aumento de la resistencia máxima de un 7,51%, un 30,43% y un 35,57% respecto a la obtenida con el hormigón REF_2%, respectivamente. Asimismo, se observa que la resistencia máxima al arrancamiento es mayor cuando mayor es la concentración de TEOS y que la concentración de 0,5% podría ser un punto de saturación del silano ya que concentraciones superiores no parecen mejorar mucho más la resistencia del

material. Por último, a la edad de 90 días los resultados de los hormigones con fibras tratadas también presentan mejores resistencias que el hormigón REF_2% pero el aumento de dichas resistencias no es muy significativo en comparación con el tiempo transcurrido desde los 28 días. Por todo esto, los mejores resultados de resistencia al arrancamiento parece ser que se obtendrían a la edad de 28 días.

Tal y como se puede observar en la Figura 5.8.e) y f), el inicio de la curva tensión-ancho de fisura representa la deformación elástica del material donde la matriz y la fibra trabajan conjuntamente. Para deformaciones inferiores a 0,05 mm, el comportamiento de los cuatro hormigones es similar pero a partir de dicha deformación, los hormigones reforzados con fibras tratadas presentan un comportamiento de *slip-hardening* hasta los 0,5 mm debido a que la fibra ya está despegada y saliendo de la matriz. Después de aproximadamente 0,1 mm de separación de la matriz, los hormigones REF_2% y T_0,1%_A_N_C no muestran incremento de resistencia para poder continuar retirando la fibra. En cambio, en los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C, la resistencia aumenta bruscamente, alcanzando la máxima a los 0,12 mm de distancia de arrancamiento.

Las propiedades de la interfase fibra-matriz se ven alteradas por la funcionalización de las fibras y también por la propia realización del ensayo. En los hormigones con fibras funcionalizadas, la pérdida de contacto entre la fibra y la matriz sucede más tarde que en el hormigón REF_2%, probablemente debido a la mejora de la adherencia fibra-matriz. Cabe mencionar que después de la separación, se continúa realizando el ensayo *pull-out* para las fibras.

En el hormigón REF_2%, después del pico, la resistencia necesaria para aumentar la distancia de arrancamiento no muestra grandes variaciones. De hecho, se mantiene constante prácticamente a lo largo de todo el ensayo. En los hormigones reforzados con fibras tratadas, después del pico, tiene lugar una disminución de resistencia en un espacio pequeño. A partir de 1 mm de distancia, el comportamiento de todos los hormigones puede ser considerado similar ya que las fibras intentan volver a su forma inicial y el fenómeno que regula el arrancamiento es la fricción.

Asimismo, los resultados muestran que el comportamiento de los hormigones con fibras funcionalizadas sería comparable al de los hormigones con fibras con extremos en gancho o fibras no alineadas. Esto se debe a que en los hormigones con fibras con extremos en gancho o con un ángulo de orientación impuesto, las fibras presentan un comportamiento *slip-hardening* similar al observado en los hormigones con fibras tratadas. Por otro lado, el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras sin deformación o desviación de ángulo serían comparables al hormigón REF_2%, que muestran un comportamiento *slip-softening* justo después de la separación de la matriz.

En los HUARRFA las fisuras se distribuyen por toda la matriz o se concentran en una zona. En este caso, la funcionalización con TEOS podría aumentar la resistencia necesaria para arrancar la fibra de la matriz y a su vez, aumentaría la tensión necesaria para crear una fisura en el material. Las fibras tratadas podrían favorecer el anclaje de la fibra a la matriz debido a la capa

de silano depositada sobre la fibra, lo que implicaría en una mayor resistencia para separar la fibra.

Por otro lado, los valores de resistencia al arrancamiento del hormigón REF_2% son mayores que los de los hormigones T_0,1%_A_N_C y T_0,5%_A_N_C a partir de la separación de 2,5 mm a la edad de 28 días. En la Tabla 5.7 se presentan los valores de tensión correspondientes a las separaciones producidas por el arrancamiento, comprendidos entre los 0,5 y 5,5 mm.

Los valores de la Tabla 5.7 muestran el notable aumento en la resistencia al arrancamiento del hormigón T_1%_A_N_C para cualquiera de las separaciones medidas. Observando el valor de referencia de 0,5 mm para el hormigón T_1%_A_N_C, el incremento promedio de la resistencia respecto a la obtenida en el hormigón de REF_2% es un 30,40%. Para el valor de referencia de 5,5 mm, este valor de incremento de resistencia respecto al hormigón REF_2% es un 10,32%.

Tabla 5.7 Pull-out: Tensiones asociadas a las separaciones por arrancamiento de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm, 4,5 mm y 5,5 mm a la edad de 28 días

ANCHO DE FISURA	TENSIONES (MPa)			
	REF_2%	T_0,1%_A_N_C	T_0,5%_A_N_C	T_1%_A_N_C
Máx.	5,06	5,44	6,60	6,86
w=0,5 mm	4,77	4,96	5,94	6,22
w=1,5 mm	4,36	4,12	4,60	5,17
w=2,5 mm	4,07	3,62	4,10	4,52
w=3,5 mm	3,80	3,27	3,68	4,20
w=4,5 mm	3,44	2,45	2,80	3,66
w=5,5 mm	2,81	2,03	2,31	3,10

Por último, volviendo a la Figura 5.8.e) y f), los valores de energía representados a la edad de 28 días muestran que la energía necesaria para el arrancamiento de las fibras de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C es mayor que la del hormigón REF_2%. De hecho, los valores de la energía para la rotura de los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C son un 1,42% y un 15,38% superiores que la energía necesaria para el hormigón REF_2%.

Así pues, se observa que el hormigón T_1%_A_N_C presenta los valores de resistencia al arrancamiento mayores para todas las separaciones medidas así como los valores de energía más grandes. Estas características lo convertirían en el hormigón más adecuado para ser ensayado a *pull-out*.

5.4 Conclusiones

En el presente capítulo se confirma que en la mayoría de los casos la fabricación de hormigones con fibras de acero tratadas es bastante factible. A pesar de los problemas de trabajabilidad durante la fabricación, ya que la mezcla se diseñó para tener una consistencia fluida pero en la realidad la textura era muy espesa dificultando la labor de llenado de las probetas, se constata que los hormigones reforzados con fibras tratadas presentan una trabajabilidad muy semejante a la del hormigón REF_2%.

Por otro lado, los ensayos de calorimetría no arrojan mucha luz en esta segunda campaña experimental. Todas las series presentan curvas muy similares y no se puede determinar la influencia del silano en el retraso de la hidratación del hormigón. De hecho, parece que el silano no influyera en el retraso siendo el principal causante la incorporación del superplastificante. Sin embargo, al utilizar *filler* en la dosificación de los hormigones en esta segunda campaña experimental, se consigue reducir el retraso casi a la mitad respecto a la campaña preliminar, pasando de 40 a 20 horas, aproximadamente.

Respecto a los ensayos de caracterización, cada uno de ellos determina un caso diferente como óptimo. El ensayo de compresión determina al hormigón T_05%_A_N_C como el más idóneo para continuar con las investigaciones, al ser el hormigón con fibras tratadas que mejor resistencia presenta. Los otros dos hormigones con concentraciones de 0,1% y 1% presentan resistencias más bajas respecto al hormigón REF_2%.

El ensayo de flexotracción toma la decisión diferenciando entre la influencia de la cuantía de fibras y la influencia de la concentración de silano en la mezcla. Por un lado, se demuestra que cuanto mayor es la cantidad de fibra incorporada, mayor es la resistencia residual. Así pues, según el criterio de la cuantía de fibras, el caso más adecuado sería el hormigón REF_3%. No obstante, la cuantía de fibras no es el único factor que influye en el aumento de la resistencia. La orientación de las fibras también es clave para obtener un material más resistente. Por otro lado, se comprueba que una mayor concentración de silano no proporciona los mejores valores de resistencia. De hecho, el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta los valores de resistencia residuales y de energía mayores. Esto indicaría que las fibras funcionalizadas con una concentración de TEOS de 0,5% serían las más adecuadas para mejorar la resistencia a flexotracción. Además, la concentración de 0,5% podría ser un punto de saturación ya que la concentración superior de 1% no mejora las resistencias.

Para determinar el caso más idóneo a partir del ensayo Barcelona, se plantea una disyuntiva a la hora de escogerlo. Mientras que el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta los valores de resistencia residuales mayores a partir de anchos de fisura de 4 mm, el hormigón REF_2% presenta los valores de energía más grandes. No obstante, si se da prioridad a la resistencia residual, el hormigón T_0,5%_A_N_C sería el más adecuado por presentar un incremento mayor de dicha resistencia.

Por último, el ensayo *pull-out* determina que el hormigón T_1%_A_N_C presenta los valores de resistencia al arrancamiento y de energía mayores, convirtiéndolo en el hormigón más adecuado para ser ensayado a *pull-out*.

Cabe señalar que mientras los ensayos de flexotracción y el ensayo Barcelona coinciden en que el hormigón T_0,5%_A_N_C sería el caso óptimo, el ensayo *pull-out* determina el caso T_0,1%_A_N_C como el más idóneo. Esto podría deberse al proceso de amasado ya que en los dos primeros ensayos la fibra está mezclada mientras que en el ensayo *pull-out* la fibra está en la dirección de la carga aplicada, necesitando más energía para arrancar la fibra de la matriz. Esto implicaría una mayor concentración de silano. No obstante, también podría deberse simplemente a un problema técnico de estabilidad durante la mezcla.

6 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1 Introducción

El presente capítulo recoge las conclusiones fruto del trabajo desarrollado a lo largo de esta Tesis de Máster, las cuales deben dar respuesta a los objetivos planteados al inicio del trabajo. Además, se plantean posibles futuras líneas de investigación surgidas a raíz de la investigación iniciada en este trabajo que pueden dar continuidad a otros estudios en mayor profundidad.

6.2 Conclusiones generales

Las conclusiones generales deben dar respuesta a la línea principal objeto de estudio de este proyecto. Por ello, deben concluir si la funcionalización con silano de tipo TEOS realizada a la superficie de las fibras de acero mejora las características de la interfase fibra-matriz, ya que esta zona es la más débil del material por donde se originan las fisuras.

Así, las fibras tratadas han demostrado que la funcionalización con silano es la etapa clave del tratamiento diseñado para aumentar la adherencia entre la fibra y la matriz. Por un lado, mediante análisis de SEM de dichas fibras, se ha comprobado que la capa de silano se ha depositado con éxito sobre la superficie de las fibras. Es importante señalar que parte de este éxito recae en las etapas previas de desengrase e inmersión en hidróxido de sodio ya que realizan una activación alcalina de la superficie de las fibras lo que propicia la efectividad de la etapa de funcionalización.

Por otro lado, mediante ensayos de caracterización del hormigón endurecido, se ha comprobado que los hormigones reforzados con fibras tratadas muestran un mejor comportamiento postfisuración, presentando resistencias residuales mayores. Este aumento en la respuesta mecánica del material sería resultado de un incremento de la adherencia entre la fibra y la matriz. Por tanto, podría decirse que se ha obtenido con éxito una mejora de la interfase mediante la funcionalización con TEOS.

No obstante, el tratamiento diseñado para llevar a cabo la funcionalización todavía está en fase de desarrollo. Esto implica que aún quedan parámetros en los que profundizar para obtener mejores resultados.

6.3 Conclusiones específicas

Las conclusiones específicas responden a los objetivos específicos que se plantearon en el capítulo 1 del presente trabajo. Estas conclusiones, que recogen los aspectos más relevantes del análisis de los resultados obtenidos en las campañas experimentales, se presentan en dos bloques. El primero de ellos corresponde a las conclusiones derivadas del análisis de los resultados referentes a la funcionalización de la fibra y el segundo bloque a las conclusiones obtenidas del análisis de los ensayos de caracterización del hormigón.

Las conclusiones obtenidas concernientes a la funcionalización de las fibras son las siguientes:

- La evaluación visual de la funcionalización confirma cambios de color y tonalidad de la superficie de la fibra lo que podría ser un primer indicio de la efectividad de las etapas del tratamiento.
- Las fibras funcionalizadas acostumbran a pesar más que las fibras de referencia ya que la capa de silano tiende a aumentar el peso de la fibra tratada. Además, cuanto mayor es la concentración de silano, mayor es el aumento de peso sufrido por la fibra.
- Los parámetros utilizados para determinar la cantidad máxima de fibra tratada por vez, la concentración de las disoluciones, el tiempo de inmersión y agitación y el tiempo y la temperatura de secado de cada una de las etapas del tratamiento han sido verificados como óptimos.
- El ensayo de microscopía óptica determina la presencia de rugosidades en la superficie de las fibras pero no es concluyente para distinguir las fibras. Ello se debe a que este ensayo no identifica una fibra que ha pasado por una etapa concreta del tratamiento y/o ha sido funcionalizada con una concentración determinada de TEOS de otra fibra cualquiera.
- El ensayo del ángulo de contacto confirma que las fibras funcionalizadas están revestidas de silano. Las fibras funcionalizadas con TEOS deben presentar un comportamiento hidrófilo al ser introducidas en una gota de disolución básica. Así pues, como la gota moja la superficie de la fibra generando un ángulo a cada lado de la fibra inferior a 90° , se podría decir que la funcionalización es efectiva.
- El ensayo SEM proporciona información química de la capa de revestimiento así como de su forma y textura. Este análisis confirma la presencia de rugosidades en la

superficie de las fibras tratadas y la efectividad de realizar las cuatro etapas del tratamiento. Por otro lado, muestra que la concentración de TEOS de 10% es excesiva ya que las fibras funcionalizadas con dicha concentración presentan mayores espesores de recubrimiento que son débiles y quebradizos.

- El ensayo SEM determina que el caso óptimo de funcionalización es aquel donde las fibras pasan por las cuatro etapas del tratamiento (desengrase, baño en NaOH, funcionalización y baño en $\text{Ca}(\text{OH})_2$) y descarta la concentración de TEOS de 10%. Ello indica que el caso óptimo se encontraría entre los casos T_0,1%_A_N_C y T_1%_A_N_C.

En relación al análisis de los ensayos de caracterización del hormigón, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Campaña experimental preliminar:

- El estudio de la trabajabilidad del hormigón muestra que la gran mayoría de ellos presenta una consistencia fluida en estado fresco. Ello se debe a que la dosificación empleada en su fabricación fue diseñada para obtener consistencias de este tipo.
- El ensayo de calorimetría refleja dos tipos de retrasos en la hidratación del hormigón: uno debido a la incorporación de superplastificante y el otro debido a la incorporación del silano. Además, se observa más retraso en la hidratación de los hormigones con fibra funcionalizada con una concentración de TEOS de 10% que en el resto de concentraciones. Esto podría indicar que el punto de saturación se encuentra en la concentración de 1%, siendo la concentración de 10% excesiva.
- El ensayo de compresión confirma que todos los hormigones alcanzan resistencias superiores a los 120 MPa y que los hormigones T_0,1%_A_C y T_1%_A_C superan el valor de la resistencia a compresión del hormigón REF. Asimismo, se observa que en esta familia de series la resistencia aumenta cuando disminuye la concentración de TEOS lo que daría fuerza a la idea de que la concentración de 10% no sería la concentración más adecuada.
- El ensayo de flexión muestra que los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_1%_A_N_C y T_10%_A_N_C superan el valor de la resistencia del hormigón REF. Además, se observa que este aumento de resistencia no es proporcional al aumento de la concentración de TEOS presentando mayor resistencia el hormigón T_1%_A_N_C. De nuevo aparece la idea de la no idoneidad de la concentración de 10%.
- Teniendo en cuenta todas estas conclusiones, en la próxima campaña experimental se decide estudiar en profundidad los hormigones reforzados con fibras que pasen por las cuatro etapas del tratamiento, dando así más importancia a la mejora de la resistencia a flexión. Respecto a la funcionalización, se decide estudiar la influencia de las concentraciones de 0,1%, 0,5% y 1%, incorporando la de 0,5% para acotar aún más la concentración óptima de silano. Además, se decide estudiar la influencia de la cuantía de fibras.

- Campaña experimental específica:

- El estudio de la trabajabilidad del hormigón muestra que todos presentan una consistencia espesa en estado fresco, a pesar de haber empleado una dosificación diseñada para obtener una consistencia fluida.
- En el ensayo de calorimetría no se aprecian diferencias concluyentes entre las curvas de hidratación de los hormigones con fibras de referencia y los hormigones con fibras tratadas. Ello implicaría que para concentraciones de hasta un 1%, la presencia de silano no influiría en la evolución de la hidratación. No obstante, en comparación con la campaña preliminar, se ha reducido significativamente el retraso de la hidratación debido al uso de *filler*.
- El ensayo de compresión muestra que todos los hormigones presentan resistencias superiores a los 120 MPa. Además, se observa que la resistencia a compresión aumenta cuanto mayor es el volumen de fibras de referencia incorporado a la matriz. De hecho, los hormigones REF_2,5% y REF_3% aumentan en un 4,10% y un 5,87%, respectivamente, en relación al valor del hormigón REF_2%.
- Por otro lado, los hormigones con fibras tratadas presentan resistencias a compresión inferiores a la del hormigón REF_2%, lo que indicaría que la funcionalización no es efectiva para mejorar la resistencia a compresión. Cabe señalar que al utilizar el refuerzo de fibras de acero, se busca principalmente mejorar la resistencia a flexión del material y no la de compresión.
- El ensayo de flexotracción también muestra que la flexión aumenta cuanto mayor es el volumen de fibras de referencia. De hecho, la resistencia máxima del hormigón REF_2,5% aumenta en un 35,57% respecto a la obtenida con el hormigón REF_2% mientras que el hormigón REF_3% aumenta en un 66,83%. Así pues, un mayor contenido de fibras implica que un mayor número de fibras cosan la fisura generada durante el ensayo alcanzando así mayores resistencias.
- Por otra parte, el ensayo de flexotracción confirma que los hormigones con fibras tratadas alcanzan resistencias máximas superiores a las del hormigón REF_2% y además, los hormigones T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C presentan valores mayores de resistencia residual. De hecho, el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta un incremento de un 5,29% respecto al valor del hormigón REF_2% para un ancho de fisura de 3,5 mm.
- El ensayo Barcelona muestra que el hormigón REF_2% presenta valores de tensión máxima y de resistencia residual superiores a los hormigones reforzados con fibras tratadas. No obstante, el hormigón T_0,5%_A_N_C presenta los valores de resistencia residuales mayores a partir de anchos de fisura de 4 mm.
- El ensayo *pull-out* muestra que los hormigones con fibras tratadas presentan mejores resistencias que el hormigón REF_2% a la edad de 28 días. De hecho, los hormigones T_0,1%_A_N_C, T_0,5%_A_N_C y T_1%_A_N_C presentan un incremento de la resistencia máxima de un 7,51%, un 30,43% y un 35,57% respecto a la obtenida con el hormigón REF_2%, respectivamente. Además, el hormigón T_1%_A_N_C presenta un gran aumento en la resistencia al arrancamiento para cualquiera de las separaciones medidas.

- El ensayo *pull-out* es el único que presenta mejores resultados para la concentración de 1%. Ello podría deberse a que en este ensayo las fibras sufren más desgaste al ser arrancadas de la matriz y podrían necesitar una concentración mayor de silano para seguir garantizando una buena adherencia fibra-matriz.

6.4 Perspectivas futuras

Una vez extraídas las conclusiones de los resultados obtenidos, se observa que todavía se ha de seguir desarrollando la metodología estudiada en el presente trabajo para mejorar sus procesos. Así pues, se comentan algunas sugerencias para futuras campañas experimentales.

- Estudiar la posibilidad de reutilizar las disoluciones utilizadas en las diferentes etapas del tratamiento, sin perder su eficiencia. Así, si el tratamiento se adaptara a gran escala, se reducirían costes, residuos generados y tiempo al no tener que preparar una disolución cada vez que se tuviera que realizar alguna de las etapas del tratamiento.
- Conocer la orientación de las fibras en el interior del hormigón, ya que es un parámetro que influye en la resistencia postfisuración del material. Para ello, se podrían realizar ensayos inductivos. De hecho, como las fibras metálicas tienen capacidad de alterar el campo magnético de su alrededor, el empleo de una bobina inductiva permitiría determinar dicha orientación.
- Realizar una campaña experimental más amplia donde se fabriquen hormigones reforzados con fibras de acero de diferentes geometrías para estudiar la funcionalización en diferentes superficies metálicas.
- Plantear una prueba piloto para determinar el comportamiento del HUARRFA frente a condiciones normales de servicio. La extracción de testigos para caracterizar su comportamiento mediante ensayos de las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abrishambaf, A. *et al.* Assessment of fibre orientation and distribution in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. Guimarães, BEFIB, 2012.
- Abrishambaf, A. *et al.* Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement and Concrete Research*, 2013; 51: 57-66.
- Abu-Lebdeh T. *et al.* Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. *Construction and Building Materials*, 2011; 25: 39-46.
- Afanador, P. M. *Funcionalización de óxido de silicio a partir de agentesacoplantestipo silano*. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga), 2008.
- Allison P. G. *et al.* Nanomechanical and chemical characterization of the interface between concrete, glass–ceramic bonding enamel and reinforcing steel. *Construction and Building Materials*, 2012; 37: 638-644.
- Aveston J. *et al.* Single and multiple fracture. Conference on the properties of fiber composites, London: 1971, 15–26.
- Aveston J., Kelly A. Theory of multiple fracture of fibrous composites. *Journal of Materials Science*, 1973; 8: 352-362.
- Banholzer B. *et al.* Analytical evaluation of pull-out tests-The inverse problem. *Cement and Concrete Composites*, 2006; 28: 564-571.
- Barnett, S. J. *et al.* Assessment of fibre orientation in ultra-high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Materials and Structures*, 2010; 43: 1009-1023.
- Barros, J. A. O. *et al.* Post-Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Materials and Structures*, 2005; 38: 47-56.
- Bentur A. *et al.* Pull-out processes in steel fibre reinforced cement. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1985; 7: 29–37.
- Bentur A., Mindess S. *FibreReinforced Cementitious Composites*. Second. London and New York: Taylor & Francis; 2007.
- Benzerzour M. *et al.* Waste fibre–cement matrix bond characteristics improved by using silane-treated fibres. *Construction and Building Materials*, 2012; 37: 1-6.
- Blanco, A. *Characterization and modelling of SFRC elements*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- Blanco, A. Durabilidad del hormigón con fibras de acero. Tesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.

- Capiotto N. Uso de silano BSTE como protector contra la corrosión de laminados de acero carbono. Tesis de Máster. Universidade de São Paulo, 2006.
- Carmona S. *et al.* Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona). *Revista Ingeniería de Construcción*, 2009; 24: 119-140.
- Casagrande C. A. *Avaliação do efeito da funcionalização da superfície de fibras de aço com silanos em matriz de concreto de ultra-alto desempenho*. Tesis de doctorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- Chan Y.-W., Chu S.-H. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 2004; 34: 1167-1172.
- Chen F. W. Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete. *ACI Materials Journal*, 1970; 67: 993-995.
- Chenkui H., Guofan Z. Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 1995; 17: 199-206.
- Child T, Ooij W. J. Van. Application of silane technology to prevent corrosion of metals improve paint adhesion. *Transactions of Institute of Metal Finishing*, 1999; 77: 42-53.
- Dupont, D., Vandewalle, L. Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, 2005; 27: 391-398.
- EHE-08, 2008. *Instrucción de Hormigón Estructural*, s.l.: Comisión Permanente del Hormigón, Ministerio de Fomento.
- Ferrara, L. *et al.* 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*, 2012; 45: 575-589.
- Galeote, E. *Correlación entre el ensayo a flexotracción y el ensayo multidireccional para HRF*. Tesis de Máster. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- Gartner E. M. *et al.* Hydration of Portland cement. *Structure and Performance of Cements*, 2002; 3: 57-113.
- Hillerborg, A. *et al.* Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 1976; 6: 773-782.
- Kooiman, A. G. *Modellin Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design*. Tesis Doctoral. Delft University of Technology, 2000.
- Lee Y. *et al.* Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 2010; 24: 2030-2041.
- Li G. *et al.* Fabrication and adhesive properties of thin organosilane films coated on low carbon steel substrates. *Surface and Coatings Technology* 2007; 201: 9571-9578.

- Li V. C. *et al.* Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites*, 1990; 21: 132-140.
- Martinie, L., Roussel, N. Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete Research*, 2011; 41, 993-1000.
- Minet J. *et al.* Organic calcium silicate hydrate hybrids: a new approach to cement based nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry*, 2006; 16: 1379-1383.
- Molins C. Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). *Materials and Structures*, 2009; 42: 415-425.
- Naaman A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003; 3: 241-252.
- Naaman A. E. Fiber to matrix bond mechanisms in FRC composite. In: Barros JAO, editor. 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities (BEFIB 2012), *RILEM Publications SARL*; 2012, 598-610.
- Naaman A. E., Reinhardt H. W. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPRCC-4: International RILEM Workshop. *Materials and Structures*, 2003; 36: 710-720.
- NPCA. Ultra High Performance Concrete (UHPC). Guide to manufacturing architectural precast UHPC elements. *National Precast Concrete Association*, 2013; 19.
- Ooij W. J. Van. Improved Service Life of Coated Metals by Engineering the Polymer - Metal Interface - Service Life Prediction of Organic Coatings - ACS Symposium Series (ACS Publications). *American Chemical Society*, 1999; 722.
- Ooij W. J. Van. Procedimiento para evitar la corrosión de los metales utilizando silanos. Traduccios de Patente Europea, 2004; 13.
- Ooij W.J. Van *et al.* Corrosion Protection Properties of Organofunctional Silanes - An Overview. *Tsinghua Science and Technology*, 2005; 10: 639-664.
- Pacios A., Fernández M. Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras. *Materiales de Construcción*, 1997; 47: 247-248.
- Piqueras J., Faura M. Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido. Técnicas de Microscopía, Micromanipulación y Análisis de Imagen. II Reunión Científica en Biología Celular y Molecular. A Coruña, España: Universidade da Coruña, 1994; 73-92.
- Puig, C. *Comportamiento mecánico del hormigón con fibras metálicas*. Tesis de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- Serna P. *et al.* Fluencia y propiedades residuales de hormigones autocompactantes con fibras expuestos en estado fisurado a diferentes condiciones ambientales. Madrid, 3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante, 2012.
- Soulioti D. V. *et al.* The effect of fibre chemical treatment on the steel fibre/cementitious matrix interface. *Construction and Building Materials*, 2013; 40: 77-83.

Stähli, P. et al. On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures*, 2008; 41: 189-196.

UNE 83515, 2010. *Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia de fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona*, s.l.: Comité Europeo de Normalización.

UNE-EN 14651, 2008. *Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*, s.l.: Comité Europeo de Normalización.

UNE-EN 196-1, 2005. *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*, s.l.: Comité Europeo de Normalización.

Wille K. et al. Properties of strain hardening ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, 2014; 48: 53-66.

Wille K. et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. *Materials and Structures*, 2012; 45: 309-324.

Won J.-P. et al. Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2006; 58: 401-410.

Won J.-P. et al. Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 2013; 102: 101-109.

Xu Y., Chung D. D. Improving silica fume cement by using silane. *Cement and Concrete Research*, 2000; 30: 1305-1311.

Xu Y., Chung D. D. Improving the workability and strength of silica fume concrete by using silane-treated silica fume. *Cement and Concrete Research*, 1999; 29: 451-453.

Zhu D., Ooij W. J. Van. Corrosion protection of metals by water-based silane mixtures of bis-[trimethoxysilylpropyl]amine and vinyltriacetoxysilane. *Progress in Organic Coatings*, 2004; 49: 42-53.