

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

# Mecanismos resistentes del hormigón reforzado con fibras en su comportamiento frente al spalling

---

Tesina Fin de Máster

---

**AUTOR/A:** Andrea Naudín López.

**DIRECTOR:** Javier Orozco Messana.

MÁSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES





## Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi tutor de la presente tesina, Javier Orozco Messana, la oportunidad que me ha dado al ofrecerme la realización de este trabajo. Por su paciencia, tiempo, recomendaciones y consejos, ayudándome en todo lo posible para que pudiese formar parte de esta investigación.

También quiero agradecer el apoyo y ánimo que me ha transmitido día a día mi familia y amigos, sin olvidar a aquellos que, sin darse cuenta, también han hecho que este trabajo sea posible.

A todos,

Gracias.



## Resumen

El objetivo de esta investigación es estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno para proponer soluciones que mejoren su resistencia frente al fenómeno del *spalling*.

El *spalling* es un fenómeno que aparece cuando un hormigón se expone a temperaturas por encima de, 200°C - 250°C, durante periodos de tiempo prolongados. Consiste en la ruptura de la estructura pétreo del hormigón por vaporización del agua libre no asociada químicamente, de manera que se crean fisuras en el hormigón. A medida que las moléculas de agua se pierden por deshidratación, el hormigón pierde cohesión y se debilita, fragmentando la sección resistente del hormigón.

Lo que se pretende al añadir fibras de polipropileno es la creación de canales interconectados cuando éstas se funden, que permitan el escape del vapor de agua generado debido al aumento de temperatura y al contenido en agua del hormigón, de manera que la presión en el interior disminuya y se reduzca el riesgo de explosión del hormigón. Otro refuerzo relevante es mediante fibras metálicas que consigan atar las micro-fisuras que pudiesen aparecer por dilatación térmica.

Para ello se ha formulado la siguiente dosificación del hormigón: CEM II/A-V 42,5 R con un 75% en peso de arena caliza lavada de 0/4 mm, y se han fabricado diferentes probetas que, una vez fraguadas, se han sometido a diferentes ciclos de temperaturas: 20°C, 100°C, 160°C, 240°C, 320°C y 400°C, para simular una situación lo más fiel posible a la situación real en que se encuentra el hormigón después de un incendio.

A partir de ensayos mecánicos y mediante la aplicación de microscopía, se pretende determinar la resistencia del hormigón, qué ocurre en la interfase fibra-matriz, cómo trabajan las fibras de acero, cómo son los canales que dejan las fibras de polipropileno tras su fusión, etc. Para ello se han realizado ensayos de flexión a tres puntos, ensayos de doble punzonamiento o ensayo Barcelona y emisión acústica. En lo referente a micros-



copía, se emplean dos técnicas, microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía óptica.



## Abstract

The aim of this research is to study the behaviour of polypropylene and steel fibres in reinforced concrete, to purpose solutions for improve its strength to *spalling* phenomenon.

The *spalling* is a phenomenon that it appears when the concrete is exposed to above temperatures, 200°C - 250°C, during long periods of time. *Spalling* consists of the breaking of petrous concrete structure by free water vaporization associated chemically so that to create fissures in the concrete. As the molecules of water are lost due to dehydration, the concrete loses cohesiveness and be weakens, breaking up resistant concrete section.

The intention of the adding polypropylene fibres is to create interconnected channels when they are melted, to allow the escape of the water vapour generated because of increased temperature and, also, due to the water content in the concrete, such that the internal pressure and the risk of explosion of the concrete are reduced. Another relevant reinforcement is by metal fibres that reach to tie the micro-cracks that may appear by thermal expansion.

For this purpose the next dosification of concrete has been formulated: CEM II/A-V 42,5 R with a 75% in weight of washed limestone sand of 0/4 mm, and different specimens have been manufactured, that, once toughened, have been subjected to several cycles of temperature: 20 °C, 100°C, 160°C, 240°C, 320°C y 400°C, to simulate a situation as true as possible to the real situation in which the concrete is after a fire.

Starting from mechanical testing and by applying microscopy , is intended to determine the strength of concrete, what happens in the fibre-matrix interface, how the steel fibres work, how are the channels that polypropylene fibres left after its melting, etc. To this effect, bending tests at three points, double punching test or Barcelona test have been carried out



and acoustic emission. In relation to microscopy two techniques are used, scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy.



## Contenidos

<b>1</b>	<b><i>Capítulo: Hormigón reforzado con fibras - Introducción..</i></b>	<b>16</b>
1.1	Objetivo .....	16
1.2	Justificación.....	17
<b>2</b>	<b><i>Capítulo: Hormigón reforzado con fibras.....</i></b>	<b>24</b>
2.1	Introducción.....	24
2.2	Fibra de vidrio.....	25
2.3	Fibras de polipropileno (PP) .....	27
2.4	Fibras de acero .....	29
2.5	Características de las fibras utilizadas .....	34
<b>3</b>	<b><i>Capítulo: Comportamiento frente al fuego.....</i></b>	<b>38</b>
3.1	Introducción.....	38
3.2	¿Qué es el <i>spalling</i> ? .....	39
<b>4</b>	<b><i>Capítulo: Mezcla de fibras de refuerzo .....</i></b>	<b>45</b>
4.1	Introducción.....	45
4.2	Cantidad de fibras y dosificación del hormigón.....	46
<b>5</b>	<b><i>Capítulo: Análisis microestructurales .....</i></b>	<b>51</b>
5.1	Introducción.....	51
5.2	Microscopía óptica .....	52
5.3	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	53
5.4	Imágenes obtenidas por SEM.....	58
<b>6</b>	<b><i>Ensayos frente al fuego.....</i></b>	<b>69</b>
6.1	Introducción.....	69



---

6.2	Ensayo de doble punzonamiento (Barcelona).....	70
6.3	Resultados del ensayo de doble punzonamiento .....	74
6.4	Flexión a tres puntos con entalla .....	94
6.5	Resultados del ensayo de flexión a tres puntos con entalla	97
6.6	Emisión acústica .....	107
6.7	Resultados del ensayo de Emisión Acústica .....	111
<b>7</b>	<b>Capítulo: Conclusiones.....</b>	<b>129</b>
7.1	Introducción.....	129
7.2	Conclusiones específicas .....	130
7.3	Conclusiones generales.....	133
7.4	Futuras líneas de investigación.....	134
7.5	Valoración personal .....	135
<b>8</b>	<b>Capítulo: Bibliografía .....</b>	<b>136</b>

---

## ***Índice de figuras***

Figura 1 Fibras de PP (izda.) y de acero (dcha.).....	19
Figura 2 Curvas carga-abertura de fisura en matrices con y sin fibras [21].....	21
Figura 3 Fibras de vidrio .....	25
Figura 4 Fibras de polipropileno.....	28
Figura 5 Efecto del tamaño de árido sobre fibras de acero de 45 mm de longitud [20] .....	30
Figura 6 Tensión deformación para $l=l_c$ y $l<l_c$ , respectivamente .....	31
Figura 7 Tensión-deformación para $l>l_c$ .....	32
Figura 8 Formas geométricas de las fibras de acero.....	33
Figura 9 Secciones de las fibras de acero.....	33
Figura 10 Curvas de tracción .....	36
Figura 11 Fenómeno termomecánico y creación de 4 zonas debido al transporte de masa, vapor y aire caliente [33].....	40
Figura 12 Spalling en esquinas, en superficie y explosivo, respectivamente [3].....	41
Figura 13 Esquema del proceso de <i>spalling</i> [5].....	42
Figura 14 Resultados del efecto <i>spalling</i> [11].....	43
Figura 15 Esquema del proceso de pérdida de adherencia [5].....	44
Figura 16 Microscopía óptica a, b y c respectivamente.....	52
Figura 17 Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM6300 .....	56
Figura 18 Radiaciones generadas .....	57
Figura 19 Fibras de PP, matriz de fractura, interfase y poros.....	59
Figura 20 Ampliación fibras de PP, matriz de fractura, interfase y poros.....	60

---

Figura 21 Sección de fibras de PP en contacto con la interfase.....	61
Figura 22 Fibra metálica con muy buena adhesión a la matriz.....	62
Figura 23 Fractura de la matriz junto a fibras metálicas .....	63
Figura 24 Fractura en la interfase y superficie con fractura frágil, respectivamente.....	64
Figura 25 fractura provocada por el fenómeno <i>spalling</i> en la interfase....	65
Figura 26 Micro-grietas creadas por el fenómeno <i>spalling</i> , interconexiones creadas por la evaporación de vapor de agua y, canal dejado por la fusión de PP .....	65
Figura 27 Arranque de fibra metálica .....	66
Figura 28 Grieta creada por el fenómeno <i>spalling</i> .....	67
Figura 29 Ampliación grieta creada por el fenómeno <i>spalling</i> .....	68
Figura 30 Esquema básico del ensayo de doble punzonamiento [38].....	71
Figura 31 Mecanismo idealizado de rotura en el que se muestra la vista en planta y una sección transversal [37] .....	72
Figura 32 Esquema idealizado del modo de rotura donde se puede observar la formación de los planos radiales y de los conos de rotura [37].....	72
Figura 33 $C_{max-A/C}$ para fibra metálica .....	78
Figura 34 $C_{max-A/C}$ para fibra de polipropileno.....	79
Figura 35 $C_{max-A/C}$ para fibra de vidrio .....	80
Figura 36 $C_{max-A/C}$ para hormigón sin refuerzo .....	81
Figura 37 $C_{max-A/C}$ para fibra metálica/polipropileno .....	82
Figura 38 $C_{max-Tipo}$ fibra para $A/C=0,4$ .....	83
Figura 39 $C_{max-Tipo}$ fibra para $A/C=0,5$ .....	83

---

Figura 40 Cmax-Tipo fibra para A/C=0,6.....	84
Figura 41 Ep-A/C para fibra metálica .....	88
Figura 42 Ep-A/C para fibra de polipropileno .....	89
Figura 43 Ep-A/C para fibra de vidrio .....	90
Figura 44 Ep-A/C para hormigón sin refuerzo .....	91
Figura 45 Ep-A/C para fibra metálica/polipropileno .....	92
Figura 46 Ep-Tipo fibra para A/C=0,4 .....	93
Figura 47 Ep-Tipo fibra para A/C=0,5 .....	93
Figura 48 Ep-Tipo fibra para A/C=0,6 .....	94
Figura 49 Configuración de la carga sobre la probeta según UNE-EN 14651:2001+A1 .....	95
Figura 50 Esquema ensayo de flexión a tres puntos con entalla según EN 14651:2005.....	96
Figura 51 LOP-A/C para fibra metálica .....	101
Figura 52 LOP-A/C para fibra de polipropileno.....	102
Figura 53 LOP-A/C para fibra de vidrio .....	103
Figura 54 LOP-A/C para hormigón sin refuerzo .....	104
Figura 55 LOP-A/C para fibra metálica/polipropileno .....	105
Figura 56 LOP-Tipo fibra para A/C=0,4.....	106
Figura 57 LOP-Tipo fibra para A/C=0,5.....	106
Figura 58 LOP-Tipo fibra para A/C=0,6.....	107
Figura 59 Características de una señal de EA [41] .....	109
Figura 60 Hits antepico-A/C para fibra metálica .....	115
Figura 61 Hits antepico-A/C para fibra de polipropileno .....	116



---

Figura 62 Hits antepico-A/C para fibra de vidrio .....	117
Figura 63 Hits antepico-A/C para hormigón sin refuerzo .....	118
Figura 64 Hits antepico-A/C para fibra metálica/polipropileno .....	119
Figura 65 Hits antepico-Tipo de fibra para A/C=0,4.....	120
Figura 66 Hits antepico-Tipo de fibra para A/C=0,5.....	120
Figura 67 Hits antepico-Tipo de fibra para A/C=0,6.....	121
Figura 68 Hits postpico-A/C para fibra metálica .....	122
Figura 69 Hits postpico-A/C para fibra de polipropileno.....	123
Figura 70 Hits postpico-A/C para fibra de vidrio .....	124
Figura 71 Hits postpico-A/C para hormigón sin refuerzo .....	125
Figura 72 Hits postpico-A/C para fibra metálica/polipropileno .....	126
Figura 73 Hits postpico-Tipo de fibra para A/C=0,4.....	127
Figura 74 Hits postpico-Tipo de fibra para A/C=0,5.....	127
Figura 75 Hits postpico-Tipo de fibra para A/C=0,6.....	128



## Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades de las fibras más comunes [20] .....	22
Tabla 2 Propiedades mecánicas diversas fibras de vidrio [22], [23] .....	27
Tabla 3 Características fibras polipropileno utilizadas [26] .....	35
Tabla 4 Características fibras de acero utilizadas [27], [28], [29] .....	37
Tabla 5 Características del Cemento CEM II/A-V 42,5 R [35] .....	47
Tabla 6 Clases resistentes [36] .....	48
Tabla 7 Tipos de cementos utilizables [36] .....	49
Tabla 8 Resultados ensayo de doble punzonamiento .....	75
Tabla 9 Resultados ensayo doble punzonamiento (2) .....	85
Tabla 10 Resultados ensayo de flexión a tres puntos con entalla .....	97
Tabla 11 Comparación entre EA y MND [41] .....	108
Tabla 12 Resultados ensayo emisión acústica .....	112



# 1 Capítulo: Hormigón reforzado con fibras - Introducción

## 1.1 Objetivo

El objetivo de esta investigación es estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero y polipropileno para mejorar su resistencia frente al fenómeno del *spalling*.

## 1.2 Justificación

La realización de esta tesina surge debido al comportamiento que posee el hormigón ante elevadas temperaturas, es decir, su comportamiento frente a incendios.

Un incendio constituye una amenaza para el hormigón, provocándole severas pérdidas de sus propiedades mecánicas y debilitándolo todavía más durante el posterior enfriamiento. Sufre inestabilidad térmica [1] que provoca la aparición de microgrietas [2]. Dado que el hormigón es un material compuesto, la forma en que éste reacciona es diferente para cada uno de sus componentes al ser expuesto a altas temperaturas [3].

Cuando se diseña un edificio, las medidas de seguridad contra incendios son un aspecto muy importante a tener en cuenta, ya que es una de las condiciones ambientales más severas en que puede encontrarse [4]. Cuando otras medidas de contención de incendio fallan, la integridad estructural es la última línea de defensa [4].

Por lo anterior, hay que considerar las diferencias que existen entre los incendios desarrollados en recintos cerrados y los desarrollados en recintos abiertos, ya que si el incendio se produce en un recinto cerrado, como por ejemplo un edificio, la temperatura es un 30% más elevada que si se produjera en un recinto abierto, por lo que el peligro es notablemente mayor. Esta diferencia se debe a los fenómenos de reflexión y radiación por parte de los cerramientos que componen el edificio [5].

En un edificio, la parte de la estructura con mayor exposición al fuego es la cara inferior de los forjados [5], cuyo sistema de trabajo es a flexión. Este comportamiento se traduce en tensiones de compresión en su cara superior y en tensiones de tracción en su cara inferior, éstas últimas sopor-

tadas por las armaduras de acero. Como se ha dicho, la cara inferior es la más expuesta, por lo que una disminución en la resistencia de las armaduras provoca la transmisión de los esfuerzos de tracción al hormigón, obteniendo como resultado una rotura frágil a cortante del hormigón y el colapso del forjado por la rotura de las armaduras sometidas a momentos negativos [5].

La pérdida de propiedades del hormigón, la disminución de la sección y de la resistencia de las armaduras [4] cuando la temperatura supera los 380°C, la destrucción de las juntas y sellados, etc. [6] puede desembocar en el derrumbamiento del recinto y/o edificio, produciéndose grandes daños materiales, e incluso en ocasiones, produciéndose también la pérdida de vidas humanas. En consecuencia, se quiere estudiar el comportamiento del hormigón bajo dichas circunstancias con la finalidad de mejorar sus propiedades resistentes y, de esta forma, reducir y/o evitar tanto daños materiales como humanos.

Una posible solución a este problema es el recubrimiento del hormigón con placas de Silicato [7]. No obstante, en la presente tesina se estudia el comportamiento del hormigón cuando éste contiene fibras de acero y fibras de polipropileno (PP), dado que, las primeras atan las fisuras retrasando su crecimiento y, las segundas provocan la disminución de la presión de poro [8] y, en consecuencia, también disminuye el riesgo de daño por *spalling* [3]. Consecuentemente, lo que se tiene es hormigón reforzado con fibras (HRF) que se define como aquél hormigón que incluye en su composición fibras discretas, cortas y distribuidas aleatoriamente en su masa [9]. En la figura siguiente (Fig. 1) se muestra el aspecto de las fibras de polipropileno y el de las fibras de acero, respectivamente.



**Figura 1 Fibras de PP (izda.) y de acero (dcha.)**

Dado que el *spalling* provoca que pedacitos de árido salten dejando pequeños cráteres en la superficie [10] y que se produce aproximadamente entre 250°C y 400°C [11], [12], el punto de fusión de la fibra debe ser preferentemente inferior a este intervalo de temperaturas, produciéndose en las fibras de polipropileno en el intervalo de 160°C a 171°C [13], [14], y su vaporización a los 341°C [14]. Este comportamiento de las fibras favorece el agrietamiento del hormigón hasta una profundidad de 50 mm, aumentando así la permeabilidad del mismo y permitiendo reducir la presión de poro debido a que ésta puede escapar a través de los poros interconectados [3]. Además, la teoría sugiere que las fibras fundidas pueden favorecer el movimiento de la humedad hacia zonas más frías dificultando así la generación de vapor y el aumento de la presión interna [3]. Sin embargo, la adición en exceso de fibras de PP puede reflejarse en una disminución de las propiedades residuales debido a la generación de poros adicionales [15].

Las variables más importantes de las fibras son el largo (determinado por el espacio entre áridos, tamaño de los mismos y el número crítico de fibras [16]) y el ancho, así como la fracción en volumen en el hormigón de las mismas [9], [15]. En referencia a la fracción en volumen de fibras, estudios realizados concluyen que para reducir el efecto del *spalling* son necesarios más de 3 kg/m<sup>3</sup> [17] de fibra de polipropileno, sin olvidar que un alto

contenido en fibras afecta a la trabajabilidad del hormigón fresco [18], por lo que no se puede exceder de un volumen de fibras límite. Por lo tanto, el número de fibras y también su longitud son inversamente proporcionales tomando un volumen de fibra dado. La efectividad es mayor en fibras largas y menor diámetro que para fibras cortas con un diámetro mayor [19].

Así pues, para generar una cantidad de conectividad óptima a nivel de poros, deberá tomarse un diámetro y longitud de fibra adecuada, obteniendo así la máxima efectividad de las mismas [11].

Las fibras de polipropileno trabajan de manera que cuando aumenta considerablemente la temperatura, tal y como ocurre en un incendio, éstas se funden y generan tras de sí pequeños canales interconectados que sirven como vía de escape para el vapor de agua que se produce en el interior del hormigón [13]. De este modo se reduce la presión interna de la estructura, disminuyendo la posibilidad de explosión del hormigón, es decir, reduciendo el efecto *spalling* [3].

Por otra parte, las fibras de acero, con función estructural, proporcionan una mayor energía de rotura, implicando en algunos casos, la sustitución total o parcial de la armadura [9]. En el caso en que las fibras de acero no tengan función estructural, se mejoran propiedades como la fisuración por retracción, la resistencia al fuego, abrasión, etc. y también la resistencia mecánica, ayudando a soportar las tensiones producidas por el aumento de la presión de poro [20], [9].

Las fibras de acero trabajan de manera que atan o cosen las fisuras, comportamiento que se traduce en un ralentizado de su crecimiento.

Cuando el hormigón soporta esfuerzos de tracción, éstos se transfieren a las fibras, a través de la interfase, una vez que se ha producido microfisuración, de manera que reducen la intensidad de la misma al tiempo

que mejoran la tenacidad. A continuación se muestra la evolución de la abertura de fisura ( $w$ ) respecto a la carga aplicada ( $P$ ), diferenciando entre matrices con y sin refuerzo de fibras (Fig. 2).

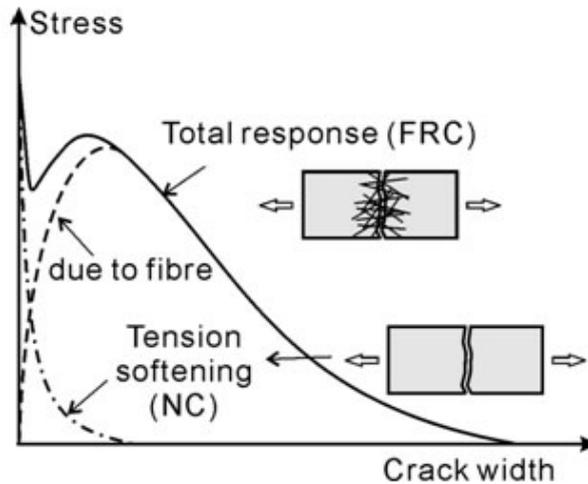


Figura 2 Curvas carga-abertura de fisura en matrices con y sin fibras [21]

Se observa que para matrices con refuerzo de fibras, la fisura crece al tiempo que sigue soportando carga debido a que las fibras actúan de manera que cosen dicha fisura. Por otra parte, en matrices sin refuerzo, el punto en que se suaviza la tensión hasta que la fisura deja de soportar carga se produce con una anchura de fisura considerablemente más pequeña, reduciendo las propiedades mecánicas del hormigón.

Hoy en día, no es único el uso de fibras de PP y de acero como refuerzo en hormigones, sino que se utilizan diversos tipos de fibras. En la tabla siguiente (Tab. 1) se adjuntan las principales características de algunos de los materiales que se utilizan para la fabricación de fibras de refuerzo, entre los que se encuentran el polipropileno y el acero, que son los que interesan.

Tabla 1 Propiedades de las fibras más comunes [20]

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Elongación de Rotura (%)
Vidrio	0.005-0.150	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Aramida	0.010	1450	3500-3600	65-133	2.1-4.0
PP	0.020-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
PE	0.025-1	960	200-300	5.0	3.0
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10
Poliéster	0.02-0.40	1400	720-860	8.3	11-13
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1.0
Nylon	0.02-0.40	1100	760-820	4.1	16-20
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56

En consecuencia, la utilización de fibras híbridas (acero y polipropileno) puede ser una solución para evitar el *spalling*, y por tanto la explosión del hormigón en incendios [20].

El método de estudio está compuesto por ensayos mecánicos y observación mediante microscopía.

Los ensayos mecánicos realizados, de los cuales más adelante se explicará la técnica y se mostrarán los resultados obtenidos, son el ensayo de flexión a tres puntos, el ensayo de doble punzonamiento o ensayo Bar-



celona y, análisis mediante emisión acústica (como apunte y futura línea de investigación). Por otra parte, se analizará el comportamiento de ambos tipos de fibras en las muestras obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía óptica.



## 2 Capítulo: Hormigón reforzado con fibras

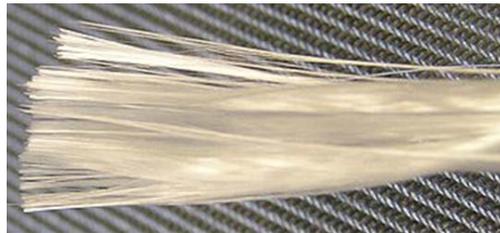
### 2.1 Introducción

En el presente capítulo se pretende introducir qué es y cómo trabaja un hormigón reforzado con fibras. Cuáles son sus principales características, así como las ventajas e inconvenientes que puede presentar en referencia a un hormigón convencional.

En este trabajo se dispone, como se ha mencionado anteriormente, de fibras de acero y fibras de polipropileno. En consecuencia, la atención de este capítulo se centrará en los distintos efectos que causan dichos materiales en el hormigón. Por otra parte, se ha utilizado, a modo de descarte, fibra de vidrio, por ello cuyos efectos y características también serán incluidos en este capítulo.

## 2.2 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la actualidad para fabricar materiales compuestos, sobre todo para aplicaciones industriales. Esto es debido a su gran disponibilidad y a sus buenas características mecánicas [22]. El uso de la fibra de vidrio se remonta a los egipcios, quienes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar ánforas en las tumbas de los faraones. Sin embargo, la producción de fibra de vidrio continua no empezó hasta la década de los años 40 gracias a la formación de la compañía Owens-Corning Fiberglass. Más tarde, en los años 60, la fibra de vidrio se utilizaba para sustituir el asbesto, ya que éste último era altamente cancerígeno. Algunas de las propiedades de la fibra de vidrio son que es incombustible, imputrescible, excelente aislante térmico, muy maleable, no produce gases tóxicos, estabilidad dimensional, compatible con materias orgánicas, etc [22].



**Figura 3 Fibras de vidrio**

El hormigón reforzado con fibra de vidrio es un material compuesto en el que se proyectan las fibras sobre un lecho de cemento en varias capas, creando finalmente un material que reúne las propiedades de ambos. Sus usos son muy variados: depósitos de líquidos, pavimentos, mobiliario urbano, elementos resistentes al fuego, reparaciones arquitectónicas, etc.

El mezclado de las fibras de vidrio es diferente al de otras fibras, como por ejemplo al de las fibras de acero. Por ejemplo, cuando hay que ejecutar capas delgadas por proyección, una madeja de fibras de vidrio ceba una pistola de aire comprimido que las corta, las baña con la lechada de

cemento y las proyecta. Además, el montaje se lleva a cabo en seco, ya que las uniones se ejecutan sobre espumas de polietileno (PE) y para el sellado de las juntas se utiliza silicona neutra o poliuretano [20].

En la práctica, los vidrios más utilizados son aquellos a base de sílice que contiene disolución de, al menos, dos silicatos: uno alcalino y otro alcalinotérreo. Los tipos de fibras de vidrio que se emplean en materiales compuestos, ya sean plásticos, hormigones u otros, son de distintos tipos entre los que se encuentran los siguientes:

- Vidrio E (Eléctrico). Vidrio de aluminoborosilicato con menos de un 1% en peso de óxidos alcalinos. Posee características dieléctricas y es el mayormente usado.
- Vidrio A (Alto contenido en álcali). Vidrio álcali-cal con pocos o ningún óxido de boro.
- Vidrio S (Alta resistencia). Vidrio de aluminosilicatos sin óxido de calcio pero con alto contenido de óxido de magnesio. Presenta resistencia a la tracción elevada.
- Vidrio ECR (Eléctrico y Resistente químico). Vidrio de silicato álcali-cal con menos de un 1% en peso de óxidos alcalinos. Posee una elevada resistencia a los ácidos.
- Vidrio R (Resistencia). Vidrio de aluminosilicatos que no contiene ni óxido de magnesio ni óxido de calcio. Tiene buenas prestaciones en relación al comportamiento a fatiga, temperatura y humedad. Se emplea, sobre todo, en aeronáutica.
- Vidrio D (Dieléctrico). Vidrio de borosilicato. Tiene muy buenas propiedades eléctricas al tratarse de un material dieléctrico.
- Vidrio AR (Álcali resistente). Presenta muy buena resistencia a los álcalis contenidos en el cemento debido a que posee un elevado contenido en óxido de circonio. Es el único que puede combinarse con el hormigón.
- Vidrio C (Químico). Vidrio álcali-cal con alto contenido de óxido de boro. Presenta buena resistencia a ataques externos como la corrosión.

En la tabla siguiente (Tab. 2) se adjuntan diversas propiedades mecánicas para algunos de los tipos de fibra de vidrio anteriormente señalados.

**Tabla 2 Propiedades mecánicas diversas fibras de vidrio [22], [23]<sup>1</sup>**

	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R	Vidrio AR
Diámetro del hilo ( $\mu\text{m}$ )	5-13	10-20	10	10	-
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	2500	2580	2500	2590	2680
Módulo Elástico (GPa)	69	72,5	86	85	72
Resistencia a tracción (MPa)	3100	3400	4590	3400-4400	3000
Resistencia a rotura (%)	-	4,5	4	5,2	4,3

El hormigón reforzado con fibra de vidrio y sus constituyentes deben regirse por el CTE (Código Técnico de la Edificación) o la NBE-CA-88 (Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Acústicas en los edificios). En referencia a los controles de fabricación, éstos están basados en las normas UNE 1169 y UNE 1170, publicaciones técnicas, etc [24].

### 2.3 Fibras de polipropileno (PP)

Las fibras de origen polimérico surgieron en la primera mitad de los años 60. Éstas están constituidas por un material polimérico extrusionado y posteriormente cortado [9].

<sup>1</sup> Los campos sin rellenar de la tabla se deben a la falta de datos experimentales buenos y contrastados.

Los polímeros son macromoléculas compuestas por una o más unidades básicas, llamadas monómeros, que se repiten formando una cadena. El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del propileno o propeno y, pertenece al grupo de las poliolefinas (olefina: uno o varios dobles enlaces C-C). En referencia al PP, hay que destacar que sus fibras tienen un precio muy competitivo frente a otras clases de fibras, además de que es químicamente inerte y muy estable en medios álcalis, como el que supone el hormigón, y ácidos, ya que presenta una superficie hidrófoba, es decir, que no absorbe agua. No obstante, el hecho de presentar una superficie hidrófoba dificulta la adherencia entre las fibras y la matriz.

Según el proceso de fabricación se pueden distinguir fibras de monofilamento extruido (tipo I) y láminas fibriladas (tipo II); y según las dimensiones se clasifican en microfibras ( $\varnothing < 0,30$  mm) y en macrofibras ( $\varnothing > 0,30$  mm). Las macrofibras, a diferencia de las microfibras, asumen funciones estructurales, y su longitud está relacionada con el árido de tamaño máximo [9]. En este caso, se considera que las fibras de PP no tienen función estructural dado que su diámetro es inferior a 0,30 mm.



**Figura 4 Fibras de polipropileno**

Las fibras de PP realizan dos tareas en el hormigón, una como plástico, aportando propiedades, y la otra como fibra, para la generación

de canales. Su resistencia a tracción, su rigidez y su dureza son mayores que las de otros polímeros como el polietileno, aunque su resistencia al impacto es menor.

En referencia a su comportamiento como fibra, cabe decir que dado que su punto de fusión está en el intervalo de 165°C a 175°C, temperaturas fáciles de sobrepasar en un incendio, alcanza su fusión e incluso evaporación.

Como se detallará más adelante, este comportamiento permite la creación de canales interconectados, los cuales proporcionarán el escape necesario al vapor de agua generado debido al incremento de temperatura. Este movimiento y escape del vapor de agua se traduce en una disminución de la presión interior y en una reducción del efecto *spalling* [20], [17].

La distribución de las fibras de PP en la matriz es uniforme, proporcionando propiedades en las tres dimensiones, así como continuidad a la pieza a pesar de ser un elemento discreto. En consecuencia, se tiene un aumento de la tenacidad, de la resistencia a la abrasión y al impacto y, un mejor comportamiento en la zona plástica. Otro aspecto a considerar es la sustitución de parte del acero por fibras de PP, consiguiendo reducir el peso de manera considerable ya que las densidades del acero y el PP son muy diferentes. Esta marcada diferencia también contribuye a que, durante el vibrado, las fibras queden embebidas en el hormigón.

Las prescripciones y controles de fabricación que deben cumplir los hormigones reforzados con fibras de PP se contemplan en el CTE (Código Técnico de la Edificación) y en las Normas UNE 83500-2:1989 [20].

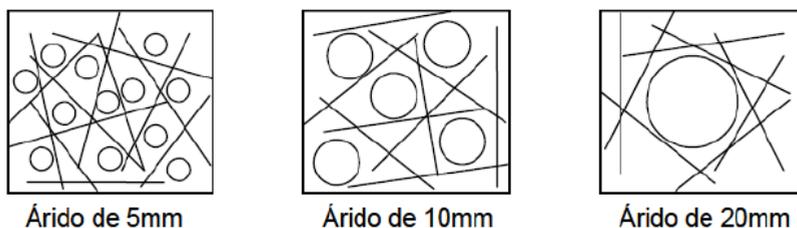
## 2.4 Fibras de acero

El hormigón que contiene fibras de acero es menos dócil que un hormigón tradicional. Es por ello que debe proporcionar una dispersión

homogénea de las fibras y así evitar una segregación de las mismas, es decir, evitar la formación de erizos.

La inserción de fibras de acero altera el comportamiento del hormigón tanto en estado endurecido como en estado fresco. Por ello, a algunos componentes se les exigen condiciones más específicas que en hormigones tradicionales. Estas condiciones adicionales dependen de la cantidad de fibras de acero añadidas y de su geometría. Dichas modificaciones se reflejan como una limitación en el tamaño del árido máximo, en una disminución de la relación grava/arena, en un aumento de los aditivos reductores de agua y, también de áridos finos para reducir el riesgo de segregación y favorecer la movilidad de las fibras.

La movilidad de las fibras de acero depende de la cantidad de árido grueso y de su tamaño máximo, ya que cuánto más altos sean estos dos parámetros, menor será la movilidad de las fibras. Según la Japan Society of Civil Engineers y la EHE Anejo 18, el máximo tamaño del árido debe ser inferior a la mitad de la longitud de la fibra. Dicha relación se cumple ya que el tamaño máximo del árido son 4 mm y la longitud central de las fibras es 60 mm. En la figura siguiente (Fig. 5) se muestra, como referencia, el efecto del tamaño del árido en la distribución de fibras de acero de 40 mm de longitud.



**Figura 5 Efecto del tamaño de árido sobre fibras de acero de 45 mm de longitud [20]**

El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo una mejor *redistribución* de la carga o esfuerzos. Por otro lado, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar

la adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad [9].

Existe una longitud de fibra crítica para incrementar la rigidez y resistencia del hormigón. Dicha longitud crítica es función del diámetro de la fibra, de la resistencia a tracción y de la resistencia de la interfase fibra-matriz, cumpliéndose:

$$l_c = \frac{(\sigma_f \cdot d)}{T_c}$$

donde

$l_c$ : longitud crítica de la fibra.

$\sigma_f$ : resistencia a tracción de la fibra.

$d$ : diámetro de la fibra.

$T_c$ : resistencia de la interfase fibra-matriz.

Las distribución de tensiones en la fibra es de cortadura en los extremos y de tracción en la zona central, tal y como se muestra a continuación. Además, dicha distribución se refleja en las curvas tensión-deformación, cuyos valores dependen de si la longitud de la fibra es mayor o menor que la longitud crítica [25]. A continuación se muestran las gráficas tensión-deformación según la longitud de la fibra (Fig. 6 y 7) [20].

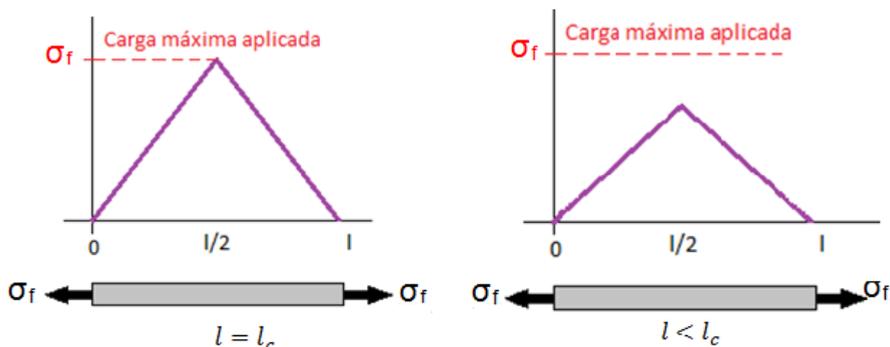
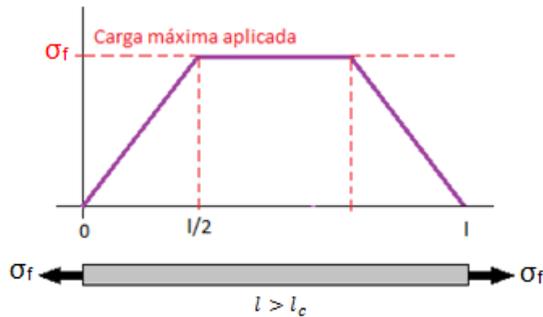


Figura 6 Tensión deformación para  $l=l_c$  y  $l<l_c$ , respectivamente

**Figura 7 Tensión-deformación para  $l > l_c$** 

donde

si  $l = l_c$ : la carga máxima se alcanza en el centro de la fibra.

si  $l < l_c$ : el refuerzo casi no se aprecia puesto que la matriz se deforme alrededor de la fibra.

si  $l > l_c$ : el refuerzo es más efectivo.

En referencia al uso de aditivos reductores de agua, su aumento se debe a que la adición de fibras de acero, como ya se ha dicho, disminuye la docilidad del hormigón. La adición de agua podría empeorar la resistencia y durabilidad del hormigón, por lo que, para evitar esta situación, se añaden superfluidificantes [20].

Por otra parte, cuando se añaden fibras de carácter metálico, hay que vigilar que el ión cloruro total aportado por los componentes no exceda del 0,4% del peso del cemento [9].

En referencia a las características de las fibras de acero, éstas deben cumplir una serie de características tales como:

- Su resistencia a tracción debe ser considerablemente mayor que la del hormigón.

- La adherencia con la matriz debe ser igual o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Su módulo de elasticidad debe ser considerablemente mayor que el del hormigón.

Según el proceso de fabricación se pueden distinguir fibras trelladas (Tipo I), cortadas en láminas (Tipo II), extraídas por rascado en caliente (virutas de acero, Tipo III) y otras (Tipo IV). Según la forma pueden ser rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc. ya que la forma tiene una gran influencia en las características adherentes fibra -hormigón [9]. A parte de la forma, la sección también puede ser muy variada: circular, rectangular, triangular, etc. En las figuras 8 y 9 se muestran los distintos tipos de formas geométricas y secciones de las fibras respectivamente.

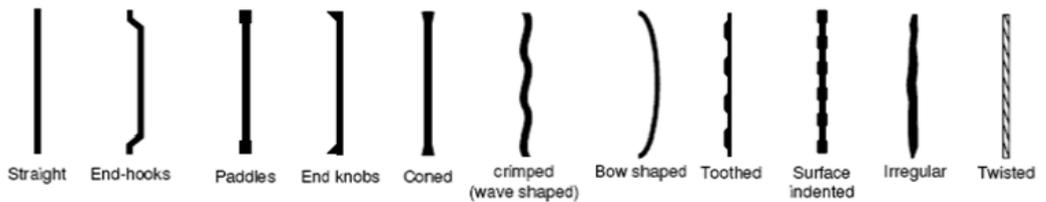


Figura 8 Formas geométricas de las fibras de acero



Figura 9 Secciones de las fibras de acero

La misión de las fibras de acero se produce a escala material y estructural. De esta forma, durante la fisuración aleatoria y durante la propagación de las macrofisuras, tal y como se ha comentado anteriormente, las fibras cosen dichas fisuras y retardan su desarrollo, incrementando la resistencia y la ductilidad. Además, también contribuyen

a aumentar la resistencia a la abrasión, erosión, etc. Por lo tanto, se requiere un contenido mínimo de fibras que, resultará menor a medida que aumente la adherencia y esbeltez de las mismas.

Las especificaciones estándar, definiciones relativas a las fibras de acero y su clasificación se rigen por las Normas UNE-EN 14889-1:2008 y la ASTM A820/A820M-06 [20].

## 2.5 Características de las fibras utilizadas

En este punto se citarán las fibras de polipropileno y acero utilizadas, así como sus principales características. No se incluyen las características de las fibras de vidrio debido a que su uso en esta tesina es a modo de descarte y, por lo tanto, no son las de interés.

### 2.5.1 Fibras de polipropileno:

Las fibras de polipropileno utilizadas en esta tesina provienen de la casa MyPHor Materiales Especiales, S. L. Estas fibras están constituidas al 100% de polipropileno (homopolímero) y se obtienen mediante extrusión. Algunas de las propiedades que aporta este tipo de fibras son que: disminuyen la permeabilidad, aumentan la resistencia al impacto y a la abrasión, reducen el riesgo de disgregación de la masa, evitan problemas de corrosión, etc. Por otra parte, no requieren de precauciones especiales para su manejo, de manera que facilitan la fabricación de las probetas [26].

Tabla 3 Características fibras polipropileno utilizadas [26]

<b>Fabricante</b>	MyPHor
<b>Denominación</b>	MPH FIBER 31
<b>Tipo</b>	Multifilamento
<b>Longitud (mm)</b>	36
<b>Diámetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	31
<b>Densidad (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>	910
<b>Elongación a la rotura (%)</b>	80-140
<b>Resistencia a tracción<sup>2</sup> (MPa)</b>	300-400
<b>Fluidez<sup>3</sup> (g/min)</b>	12
<b>Módulo de elasticidad<sup>4</sup> (MPa)</b>	600-1200
<b>T<sup>a</sup> de distorsión<sup>5</sup> (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	110
<b>T<sup>a</sup> de fusión (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	160-170
<b>T<sup>a</sup> de descomposición<sup>6</sup> (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	280
<b>Dosis recomendada (<math>\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	600

<sup>2</sup> Según método ASTM D-638.

<sup>3</sup> Según método ASTM D-1238.

<sup>4</sup> Según método ASTM D-790.

<sup>5</sup> Según método ASTM D-648.

<sup>6</sup> Según método ASTM D-648.

## 2.5.2 Fibras de acero:

Las fibras de acero utilizadas provienen del fabricante Bekaert. De entre las variedades que ofrecen, se ha escogido la fibra Dramix® 3D diseñada para uso común, de 60 mm de longitud central. Estas fibras combinan un alto rendimiento, durabilidad y facilidad de uso, proporcionando un ahorro de tiempo y una alternativa con coste eficiente para los refuerzos de hormigones tradicionales.

Respecto a los anclajes, los extremos en forma de gancho garantizan la tracción deseada de la fibra. Es el mecanismo que genera la conocida ductilidad del hormigón y la resistencia después de la grieta. Este tipo de fibra crea ductilidad en el hormigón debido a la lenta deformación de los ganchos durante el proceso de tracción, y no por la ductilidad de la propia fibra. En referencia a la fibra, su resistencia a tracción tiene que aumentar en paralelo con la fuerza de su anclaje. Sólo de esta manera la fibra puede resistir las fuerzas que actúan sobre ella, de lo contrario, la fibra se rompería haciendo que el hormigón fragilizase. Por ello, Dramix® 3D aprovecha la fuerza de la fibra en su máxima medida.

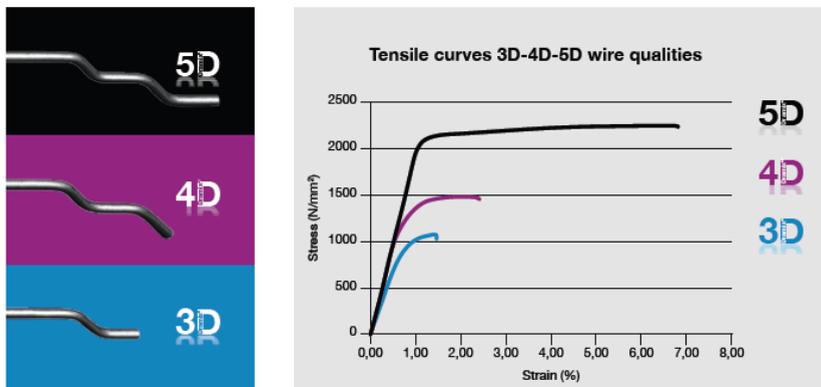


Figura 10 Curvas de tracción

Una vez introducidas las fibras de acero utilizadas, en la Tabla 4 se adjuntan las principales características de las mismas.

**Tabla 4 Características fibras de acero utilizadas<sup>7</sup> [27], [28], [29].**

<b>Fabricante</b>	Bekaert
<b>Denominación</b>	Dramix® 3D
<b>Tipo</b>	RC-80/60-BN
<b>Longitud central (mm)</b>	60
<b>Diámetro (mm)</b>	0,75
<b>Esbeltez (L/D)</b>	80
<b>Sección</b>	Circular
<b>Resistencia a tracción (MPa)</b>	1050
<b>Dosificación (fibras/kg)</b>	4600
<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>	210000
<b>Acabado</b>	Brillante
<b>Contenido en carbono</b>	Bajo

<sup>7</sup> Cumplen la certificación CE, la normativa ASTM A820, la ISO 14001 y la ISO 9001.



## 3 Capítulo: Comportamiento frente al fuego

### 3.1 Introducción

Una vez introducido el objeto de estudio así como las características del hormigón reforzado con fibras (HRF), no hay que olvidar qué es lo que experimenta el hormigón cuando incrementa su temperatura.

Cuando el hormigón incrementa su temperatura rápidamente, empieza a calentarse desde la superficie hacia el interior, es decir, hacia el núcleo. Esta dirección de propagación de la temperatura provoca la existencia de un gradiente térmico entre la superficie y el núcleo, que se traduce en la

aparición de tensiones internas que a su vez propician la aparición de grietas internas.

### 3.2 ¿Qué es el *spalling*?

Un incremento de temperatura del hormigón provoca la activación de fenómenos termomecánicos, es decir, la dilatación de las armaduras produciéndose un aumento de las tensiones de compresión en sentido perpendicular a la superficie. Por otra parte, también provoca gradientes de presión que dan lugar a transportes de masa y a la transmisión de una parte del vapor de agua y de aire caliente a la superficie caliente del hormigón. La otra parte de vapor de agua se transfiere al núcleo del hormigón. Zona en la que condensa. En referencia a los gradientes de presión, ésta será máxima al inicio del calentamiento e irá disminuyendo a medida que el hormigón pierda humedad. El pico de máxima presión de vapor se localiza en valores próximos a 230°C y a una profundidad inferior a 10 mm tomando como referencia la superficie [30].

El resultado de este comportamiento es la aparición de cuatro zonas o capas diferenciadas [33]:

- una capa seca,
- una zona con vapor,
- dos zonas húmedas.

En la figura siguiente (Fig. 11) se muestra, respectivamente, el fenómeno termomecánico y las 4 zonas que se crean debido al transporte de masa, de vapor y aire caliente.

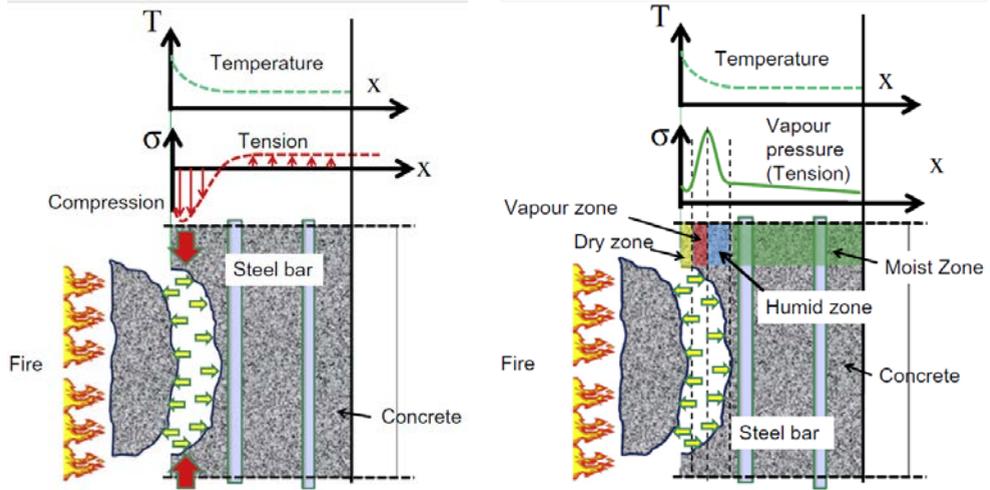


Figura 11 Fenómeno termomecánico y creación de 4 zonas debido al transporte de masa, vapor y aire caliente [33]

El calentamiento de la superficie más externa provoca la evaporación continua de agua, favoreciendo así que el espesor de la zona seca aumente de manera constante. Se estima que la presión de vapor en la parte frontal es de 1,4 MPa [32]. Asimismo, la temperatura se incrementa a medida que se desplaza hacia el interior, tal y como se ha comentado anteriormente, y la capa casi-saturada no cesa su movimiento, también hacia el interior, hasta que la muestra se ha secado completamente.

Otro factor a tener en cuenta, es la velocidad de calentamiento. Cuando ésta aumenta, también aumenta el riesgo de que el hormigón sufra daño por *spalling*. Si bien, no hay que dejar de lado ni el efecto del incremento de temperatura ni el efecto de los gradientes de presión, ya que también contribuyen a que se produzca el fenómeno del *spalling*. [30], [6], [31]

El *spalling* es un fenómeno que aparece cuando un hormigón se expone a temperaturas por encima de, 250°C - 400°C [11], [12], durante periodos de tiempo prolongados. Puede clasificarse en cuatro categorías [3]:

- Spalling colectivo.
- Spalling explosivo.
- Spalling en superficie.
- Spalling en esquinas.

Los tres primeros ocurren durante los primeros 20-30 minutos de exposición al fuego. El último ocurre después de 30-60 minutos de exposición y está influenciado por la máxima temperatura [3].

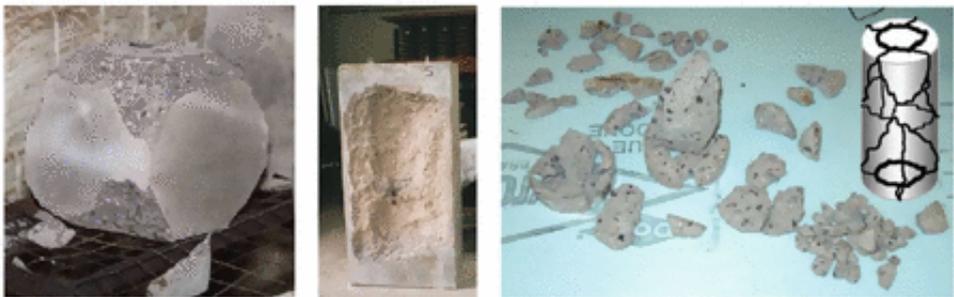


Figura 12 Spalling en esquinas, en superficie y explosivo, respectivamente [3]

Consiste en la ruptura de la estructura pétreo del hormigón por vaporización del agua libre no asociada químicamente, de manera que se crean fisuras en el hormigón. Según [12] entre 100-130°C se produce la evaporación del agua adsorbida, alrededor de los 200°C la liberación del agua hidratada, en el rango de 300-400°C puede aparecer el *spalling* y, aproximadamente a los 500°C se descompone la portlandita.

A medida que las moléculas de agua se pierden por deshidratación, el hormigón pierde cohesión y se debilita, fragmentando la sección resistente del mismo [7]. Estas coqueras dejan expuesto a elevada temperatura el hormigón fresco que hay debajo, por lo que el desprendimiento ocurre a una velocidad mayor y, como la superficie interior queda expuesta al humo

y hollín, las grietas y coqueras adquieren un aspecto ennegrecido [5]. A continuación se muestra un esquema del proceso del fenómeno *spalling* (Fig. 13).

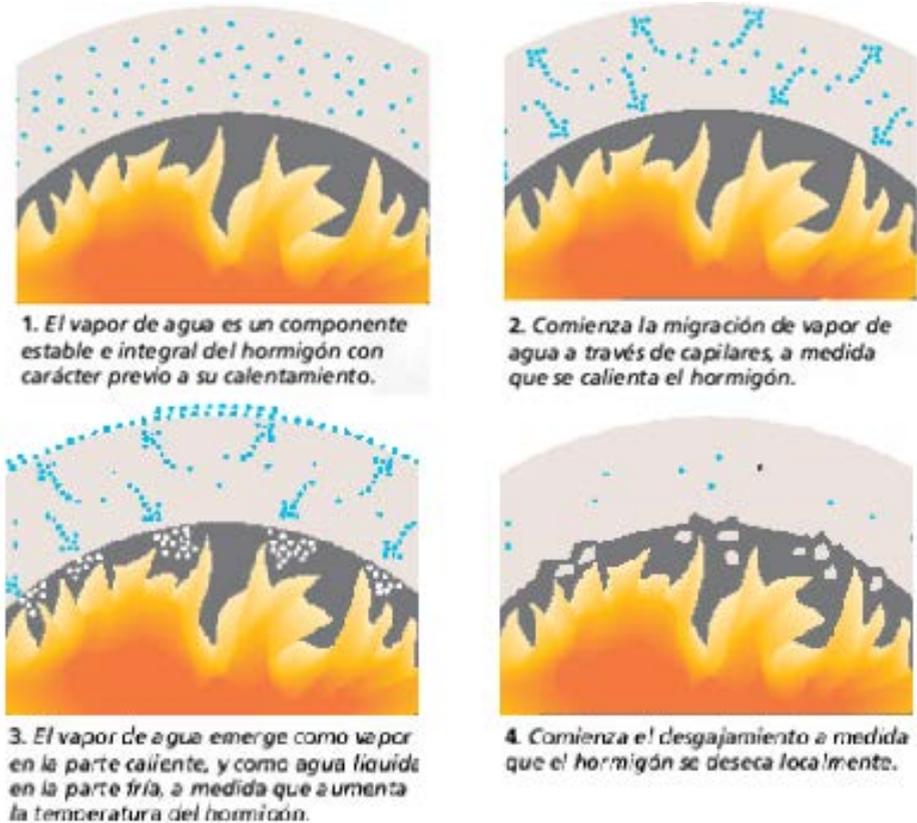


Figura 13 Esquema del proceso de *spalling* [5]

A pesar de que es poco probable que falle completamente un hormigón convencional, los costes de reparación pueden ser elevados, por lo que los aspectos económicos también constituyen una razón por la que estudiar este fenómeno. En la figura siguiente puede apreciarse el color ennegrecido de las grietas y coqueras tras haber estado expuestas a humo y hollín (Fig. 14).



**Figura 14 Resultados del efecto *spalling* [11]**

A pesar de que no es un problema en hormigones tradicionales, ya que tienen aproximadamente un 3% en volumen de humedad, y por debajo del 5% no hay riesgo de *spalling* [32], sí que lo es en hormigones densificados, debido a que la expansión térmica está restringida porque tienen una matriz más densa y menos permeable.

Otro efecto nocivo que provocan los incendios en las estructuras de hormigón es la pérdida de adherencia entre las armaduras de acero y el hormigón que las recubre debido al salto térmico existente entre ambas. La condición de unión hormigón-armadura tiene una gran influencia en la resistencia al fuego, especialmente cuando la temperatura del refuerzo supera los 500°C [34].

La existencia de coqueas facilita la penetración de las altas temperaturas hasta las armaduras, las cuales a diferencia del hormigón, se calientan con rapidez y se dilatan, provocando tensiones de compresión que, una vez producido el enfriamiento, desembocan en roturas. Debido a que estas roturas se producen durante el enfriamiento (cuando ya no hay humo) adquieren una apariencia blanquecina porque el interior no está ahumado. En la figura 15 se muestra el proceso de pérdida de adherencia entre el hormigón y las armaduras.



Figura 15 Esquema del proceso de pérdida de adherencia [5]

No obstante, en esta tesis fin de máster se tratarán los problemas generados por el efecto *spalling* y no los generados exclusivamente por la pérdida de adherencia, ya que tiene consecuencias más agresivas.



## 4 Capítulo: Mezcla de fibras de refuerzo

### 4.1 Introducción

En este capítulo se pretende explicar la dosificación del hormigón utilizado, así como el tipo de fibras y cantidad de las mismas.

En la dosificación del hormigón reforzado con fibras se deben tener en cuenta varios parámetros relacionados con la longitud y diámetro de las fibras, tal y como se ha explicado anteriormente, debido a la influencia que tienen en la trabajabilidad del hormigón, entre otros.

En esta tesina se han utilizado diversos tipos de fibras entre las que se encuentran fibras metálicas, fibras de polipropileno, fibras de vidrio y, una mezcla de fibra metálica y fibra de polipropileno.

## 4.2 Cantidad de fibras y dosificación del hormigón

Los tipos de fibras utilizados, descritos anteriormente, son fibra metálica, de polipropileno, de vidrio y, una mezcla de metálica con polipropileno. La razón por la que se utilizan este tipo de fibras es que las metálicas cosen las fisuras y las de PP forman canales que permiten disminuir la presión interior.

La cantidad de cada uno de los tipos se ha determinado a partir de una referencia bibliográfica [18], estableciendo una cantidad óptima en un punto intermedio. Finalmente se ha trabajado con  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibra metálica,  $3 \text{ kg/m}^3$  de fibra de polipropileno y,  $20/3 \text{ kg/m}^3$  en la mezcla de fibra metálica con polipropileno. También se ha utilizado fibra de vidrio con un volumen de  $4 \text{ kg/m}^3$ .

En referencia al hormigón, el utilizado en esta tesina es un hormigón tipo, usado típicamente para aplicaciones estructurales, ya que el objeto de estudio es la influencia de las fibras en una dosificación habitual, como ya se ha dicho, de uso estructural. Dicha dosificación también se ha elaborado a partir de [18].

La elección de la dosificación se debe a que el comportamiento del FRC depende principalmente de la cantidad y forma de las fibras. Cuanto más largas sean éstas, más difícil será que el hormigón fluya, pero por otro lado, las fibras largas son las que aportan un mejor comportamiento estructural. En consecuencia, debe llegarse a un acuerdo entre la cantidad y forma de las fibras y, las características resistentes necesarias cuando la mezcla fragüe [18].

Al trabajar con un HRF, deben hacerse ajustes en la dosificación con respecto a un hormigón tradicional. Es por ello que se corrige la cantidad

de agua teniendo en cuenta la absorción de la misma por parte del árido y su humedad. Esto se lleva a cabo siguiendo la normativa UNE 83133:1990 i 83134:1990 [18].

También deben corregirse las fibras para paliar la pérdida de trabajabilidad que supone la adición de las mismas. La grava es el árido que más se opone a la fluidez, por lo que sustituyéndolo por fibras no se pierden tantas prestaciones. Aunque esta corrección no es significativa con volúmenes de fibra inferiores a  $60 \text{ kg/m}^3$  [18].

Por lo explicado anteriormente, la dosificación del hormigón utilizado es CEM II/A-V 42,5 R (de la muy conocida y experimentada casa CEMEX) con un 75% en peso de arena caliza lavada de diámetro 0/4 mm. Este cemento cumple con la normativa UNE EN 197-1:2000, y su composición se muestra en la tabla siguiente (Tab. 5).

**Tabla 5 Características del Cemento CEM II/A-V 42,5 R [35]**

<b>Componentes</b>	
Clinker	80 a 94 %
Cenizas volantes silíceas	6 a 20 %
Componentes adicionales	0 a 5 %
<b>Características químicas</b>	
Anhídrido Sulfúrico ( $\text{SO}_3$ )	$\leq 4 \%$
Cloruros (Cl)	$\leq 0,1 \%$
<b>Características físicas</b>	
Principio de fraguado	$\geq 60$ minutos
Expansión Le Chatelier	$\leq 10$ minutos
<b>Resistencia a compresión</b>	
2 días	$\geq 20 \text{ MPa}$
28 días	$\geq 42,5 \text{ MPa}$
	$\leq 62,5 \text{ MPa}$

El uso de cementos tipo II está más extendido que el uso de cementos tipo I, ya que además de mejorar determinadas propiedades, utilizan ciertos productos naturales y subproductos industriales en su fabricación, permitiendo un cierto ahorro económico [36].

En referencia a las adiciones, éstas pueden clasificarse, según su capacidad de reacción, en las que reaccionan con el agua (p.e. escorias siderúrgicas) y las que tienen propiedades puzolánicas (p.e. cenizas volantes silíceas). Las cenizas volantes silíceas (identificadas con una V, y presentes en el cemento utilizado) son puzolanas artificiales, es decir, residuos sólidos obtenidos por captación mecánica o por precipitación electrostática de las partículas que acompañan a los gases de combustión en las centrales termoeléctricas cuyo combustible es el carbón. Cabe decir, que las cenizas volantes silíceas otorgan al hormigón una coloración oscura [36].

En referencia a los cementos, la Instrucción RC-08 (Instrucción para la Recepción de Cementos) incluye una clasificación en tipos según sus componentes y, una clasificación en clases según su resistencia. La nomenclatura es la siguiente:

- Clases resistentes. Existen tres clases resistentes que se identifican por los números 32,5 / 42,5 / 52,5 MPa, y que hacen referencia a la resistencia mínima a compresión del cemento a los 28 días. Dicha clase resistente va acompañada de las letras N o R, que hacen referencia a la resistencia inicial del cemento siendo N (normal) y R (alta) [36].

**Tabla 6 Clases resistentes [36]**

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Clase resistente</b>
Endurecimiento lento	32,5 N
Endurecimiento normal	32,5 R-42,5 N
Endurecimiento rápido	42,5 R-52,5 N-52,5 R

- Tipos y subtipos. Según la RC-08 los tipos y subtipos de cementos que se consideran en España son los que se muestran en la tabla 7. Por otra parte, según la EHE-08, su uso queda limitado a lo recogido en dicha tabla [36].

**Tabla 7 Tipos de cementos utilizables [36]**

Tipo de hormigón	Tipo de cemento
en masa	Cementos comunes <sup>8</sup> excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C.  Cementos para usos especiales ESP VI-1
armado	Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C y CEM V/B.
pretensado	Cementos comunes de los tipos CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P, CEM II/A-M(V,P)

Respecto a los áridos, éstos se dividen por su tamaño en arenas y gravas. Haciendo referencia a la normativa española, la arena o árido fino es el que pasa por el tamiz de 4 mm y la grava o árido grueso es lo que queda retenido. Asimismo, la arena o árido fino puede clasificarse en arena gruesa si  $\geq 2$  mm, arena fina si  $< 2$  mm y finos o *filler* si  $< 0,063$  mm. Como las fibras alteran el esqueleto mineral, ya que disminuyen su densidad al aumentar la porosidad, es necesario aumentar la cantidad de árido fino para compensarlo. Hay que tener en cuenta que la arena es el árido de mayor responsabilidad en el hormigón. De hecho, hay países en los que existen normativas para la confección de hormigones que hacen referencia

<sup>8</sup> La utilización permitida a los cementos comunes se considera extendida a los cementos blancos o a los cementos con características adicionales (MR, SR, LH, VLH).



a las granulometrías de arenas y gravas, en cambio, en España, la EHE-08 sólo establece limitaciones en cuanto al árido fino [36].



## 5 Capítulo: Análisis microestructurales

### 5.1 Introducción

En el presente capítulo se quiere estudiar y comprobar el comportamiento de las fibras en la matriz. Para ello, se dispone del microscopio electrónico de barrido (SEM) y del microscopio óptico.

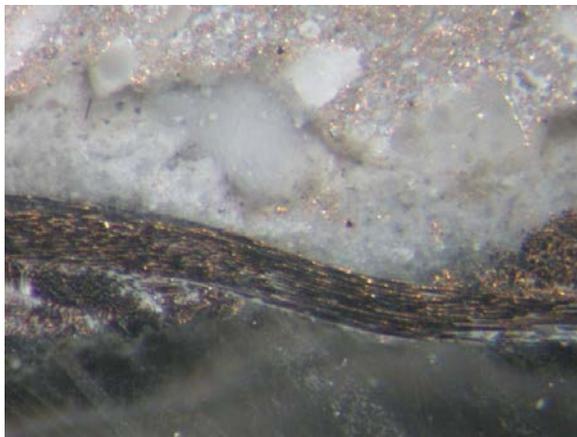
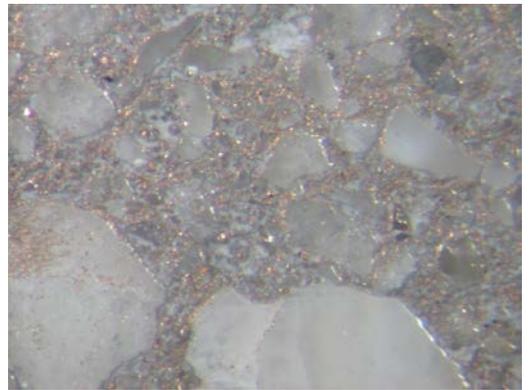
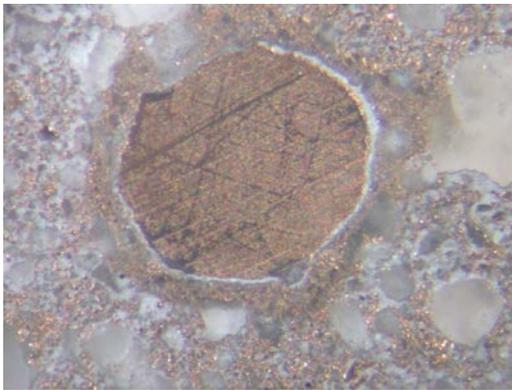
El hecho de utilizar el microscopio electrónico de barrido (SEM) se debe a que permite obtener imágenes topográficas y, análisis cuantitativos y cualitativos, que facilitan la observación de la formación de canales producidos por la fusión de las fibras de polipropileno, el comportamiento de la interfase fibra-matriz y, el comportamiento de las fibras de acero. Por otra

parte, el microscopio óptico permite identificar diferentes fases, de manera que ayuda a seleccionar las muestras de interés para el SEM.

## 5.2 Microscopía óptica

El microscopio óptico permite la observación, a nivel microscópico, del contraste de elementos que forman la muestra. Esto es posible mediante la interacción de la luz visible y la muestra.

En este caso se han seleccionado tres imágenes obtenidas mediante esta técnica



**Figura 16 Microscopía óptica a, b y c respectivamente**

En la primera figura (Fig. 16.a) se aprecia la sección de una fibra metálica, la interfase y la matriz con áridos gruesos y finos. Cabe destacar que, el perímetro de la fibra puede verse claramente y, que junto a ella no hay áridos gruesos, sino que solamente finos. En la Figura 16.b se muestran áridos gruesos y finos junto con la matriz. Finalmente, en la última figura (Fig. 16.c) aparece una fibra de polipropileno de forma longitudinal junto con la interfase y una parte de la matriz. Al igual que en la primera figura, tampoco hay árido grueso en la zona cercana a la fibra.

La localización de los áridos en la matriz próxima a las fibras, situándose los finos cerca y los gruesos más alejados, se mantiene en las diferentes muestras observadas en el microscopio.

### 5.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) se basa en la detección y visualización de los electrones secundarios y retrodispersados procedentes de la interacción de un haz de electrones sobre la muestra que se va a observar. El haz de electrones tiene una potencia variable entre 1 y 50 keV y se realiza un vacío del orden de  $10^{-7}$  atmósferas en la cámara de la muestra.

El haz de electrones se focaliza sobre la superficie de una muestra masiva, barriendo la superficie de la misma. Los electrones secundarios y retrodispersados son captados por un detector, llevándose la señal a un tubo de rayos catódicos, donde es representada. En dicho tubo la señal realiza un barrido de la pantalla, de manera sincronizada con el movimiento del haz electrónico, sobre la muestra formando una imagen aumentada de la superficie.

Los cambios en el aumento se consiguen variando el tamaño del área barrida en la muestra mientras se mantienen constantes las dimensiones de la imagen en la pantalla, siendo del orden de 10 x 10 cm. En general, los aumentos pueden variar entre 10 y 200000.

La obtención de la imagen se realiza mediante los electrones secundarios (SE) y los retrodispersados (backscattered, BSE). Se consideran electrones secundarios los emitidos por la muestra con una energía inferior a 50 eV.

De la interacción entre el haz electrónico y la muestra aparecen los electrones secundarios a través de todo el volumen de interacción, pero sólo aquellos generados próximos a la superficie abandonarán la muestra y contribuirán a la señal. La profundidad de penetración es de 1 nm para metales y de 10 nm para los materiales de bajo número atómico.

Se consideran electrones retrodispersados aquellos que poseen energías desde los 50 eV a la energía de los electrones primarios. Los electrones retrodispersados resultantes de una interacción, más hacia el interior de la muestra, pueden tener un mayor esparcimiento lateral que el haz primario, por esta razón, la resolución de la imagen es peor que la resolución de los SE.

### 5.3.1 Componentes

El microscopio electrónico de barrido está formado por los siguientes componentes:

- Emisor de electrones

La fuente de electrones es un filamento caliente de wolframio o un cristal de hexaboruro de Lantano ( $\text{LaB}_6$ ) que por efecto termoiónico emite electrones. Estos electrones son acelerados por un potencial negativo, típicamente de 100 kV, como el utilizado en esta tesina.

- Lentes condensadoras

El sistema de lentes condensadoras permite variar la intensidad de la iluminación, es decir, la densidad de corriente del haz, en el plano de la muestra para adaptarla al tipo de muestra y al aumento final requerido.

- Lente de barrido

Para la realización de la acción de barrido del haz sobre la muestra se dispone de un par de bobinas electromagnéticas en el borde de la lente final que suministran la deflexión necesaria del mismo. En el sistema de doble deflexión, utilizado en la mayor parte de los microscopios, dos pares de bobinas se alimentan con un generador de barrido controlado por un oscilador que suministra distintas frecuencias para el barrido a lo largo de los ejes OX y OY. Cuanto más despacio se barre una línea, menos ruido aparece la imagen.

- Portamuestras

Este elemento permite mover la muestra en tres direcciones perpendiculares entre sí (x, y, z).

- Sistemas de detección

Los electrones se detectan en un sistema formado por un centelleador y un fotomultiplicador.

- Sistemas de visualización

En general, la imagen se registra fotografiando la pantalla de un tubo de rayos catódicos con un tiempo de exposición (del orden de 30 a 200 segundos) igual al del barrido de todas las líneas que forman la imagen. Este número de líneas es superior al que puede resolver la pantalla, por lo que no se ven en las fotografías. También hay que tener en cuenta las distancias de trabajo, que en esta tesina han sido de 15 mm.

En la figura que se adjunta a continuación (Fig. 17) se muestra el SEM utilizado en esta tesina. Se trata de un microscopio electrónico de barrido de la casa JEOL, modelo es el JSM6300, y se encuentra en el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, edificio 8D.



**Figura 17 Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM6300**

### 5.3.2 Microanálisis

Cuando electrones con una determinada energía son bombardeados sobre una muestra causan la emisión de rayos X (además de otras radiaciones) cuyas energías y abundancia dependen de la composición de la muestra. En la figura siguiente (Fig. 18) pueden observarse las radiaciones emitidas.

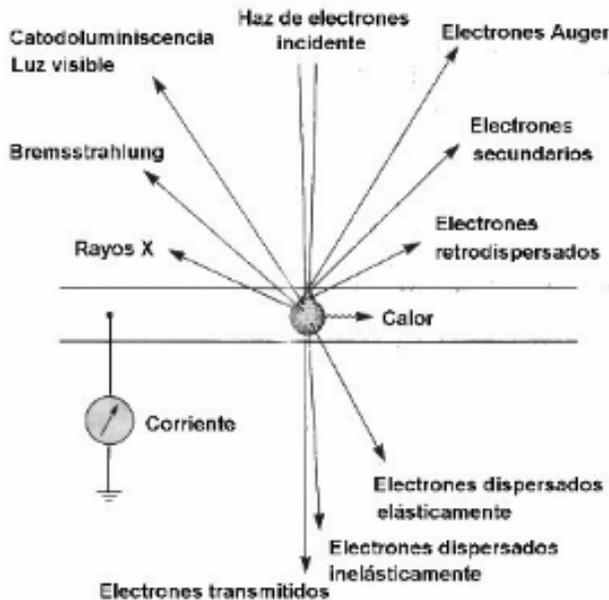


Figura 18 Radiaciones generadas

Mediante la adecuada detección de éstos se puede realizar tanto un análisis cualitativo (qué elementos están presentes en la muestra) como un análisis cuantitativo (en qué cantidad).

- Generación de Rayos-X

Los rayos X son ondas electromagnéticas con una energía comprendida entre 1 y 500 keV. Se generan por la interacción de los electrones primarios con los átomos de la muestra. Esta radiación es característica de cada elemento y se produce de la siguiente manera: un electrón primario procedente del cañón de electrones del SEM expulsa a un electrón de una capa interna de un átomo de la muestra. La posición vacante es ocupada entonces por un electrón de una capa de mayor energía (más externa). Al pasar a un estado de menor energía, la energía emitida por este electrón aparece en forma de radiación electromagnética. La cantidad de energía emitida es entonces completamente igual a la diferencia de energías de las dos capas implicadas. Dado que esta energía es bas-

tante grande para niveles de energía internos, la radiación aparece en forma de rayos X. En una muestra compuesta de diferentes elementos, la emisión total de rayos X dará lugar a un espectro.

- Obtención del espectro

En la obtención del espectro de rayos X total para una muestra dada, se pueden considerar dos procesos de emisión diferentes. El primer proceso recibe el nombre de radiación de frenado (o Bremsstrahlung) y se produce por una interacción electromagnética inelástica del campo producido por un núcleo atómico; el segundo proceso es el producido por la emisión de rayos X al pasar un electrón de una capa externa del átomo a una más interna (donde había una vacante producida por un átomo primario). Estas emisiones generan una serie de líneas superpuestas al espectro continuo que son las que propiamente caracterizan a los elementos presentes en la muestra (picos característicos).

Como ya se ha dicho anteriormente, la técnica del SEM permite realizar análisis cualitativos y cuantitativos.

El análisis cualitativo es el proceso de identificación de los elementos que están presentes en una muestra. Esto se consigue determinando las energías de los distintos elementos, representándolas como picos característicos y, una vez obtenido el espectro, se compara con un espectro conocido.

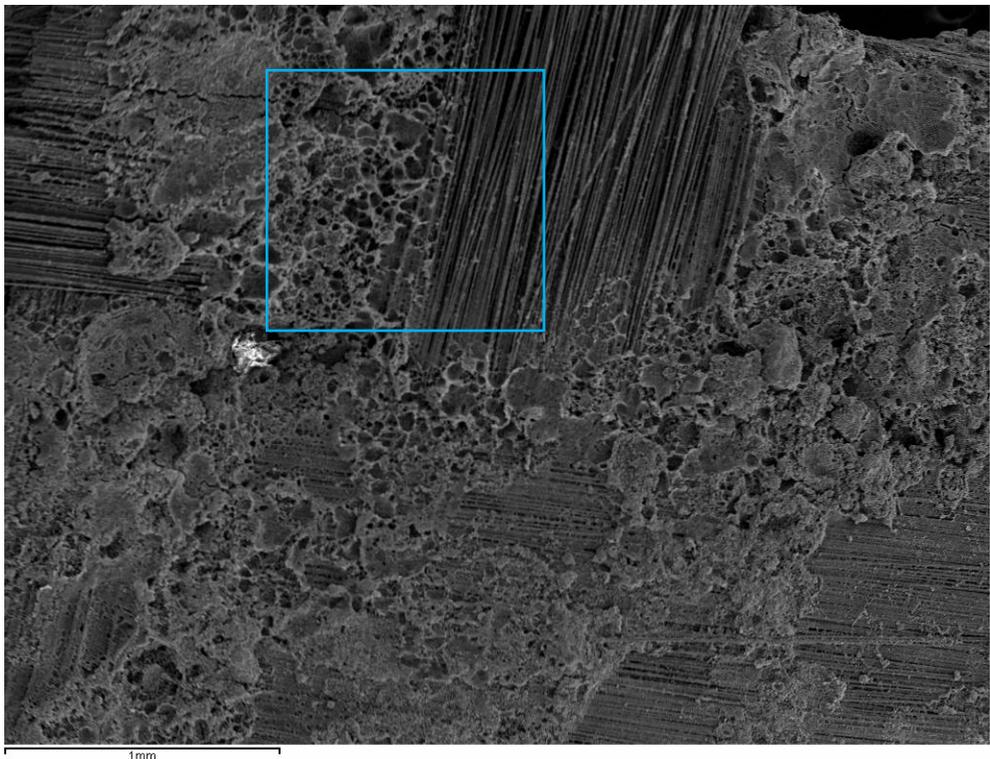
Por otra parte, el análisis cuantitativo pretende no sólo identificar la identidad de los elementos sino también sus concentraciones mediante el uso de un patrón, junto con la indicación de la confianza de los resultados obtenidos [37].

## 5.4 Imágenes obtenidas por SEM

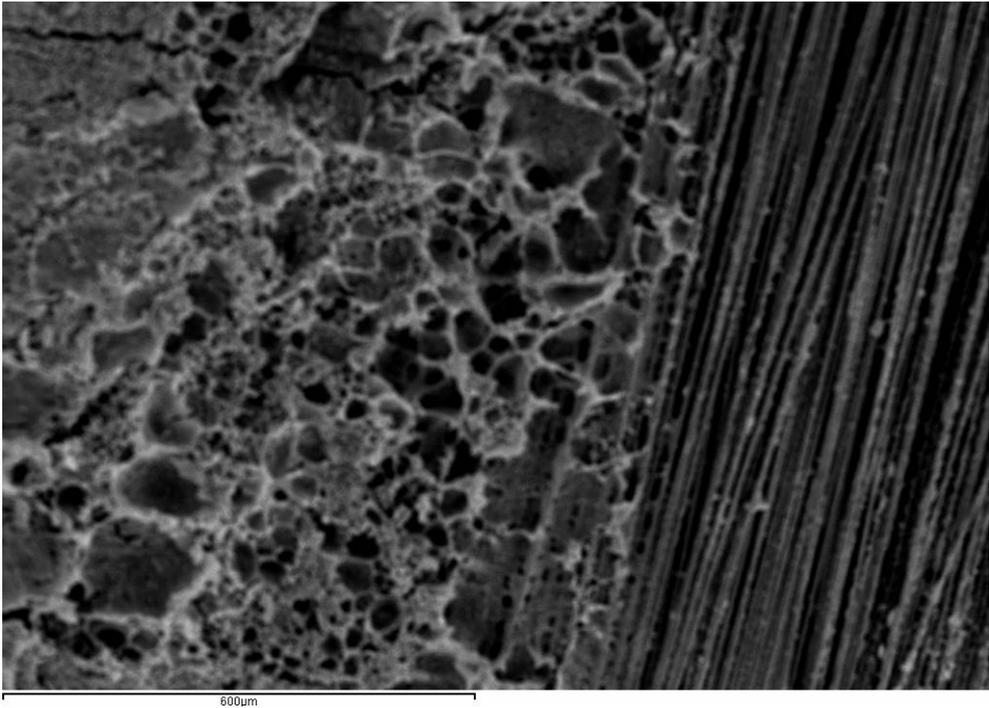
En este apartado, se muestra una selección de las imágenes obtenidas mediante SEM. Se pretende mostrar evidencias del trabajo que reali-

zan las fibras, así como la orientación y los canales formados a partir de la fusión de las fibras poliméricas que soporten las hipótesis de la presente tesina.

En la siguiente figura (Fig. 19) y en la ampliación de la misma, marcada con un recuadro azul claro (Fig. 20), se aprecia un conjunto de fibras de polipropileno mal dispersas envueltas en matriz de fractura y, poros generados por aire ocluido junto a superficies de fractura nucleada en la evaporación térmica. En la imagen ampliada puede apreciarse mejor la unión entre las fibras que están unidas a la interfase y, los poros mencionados anteriormente.

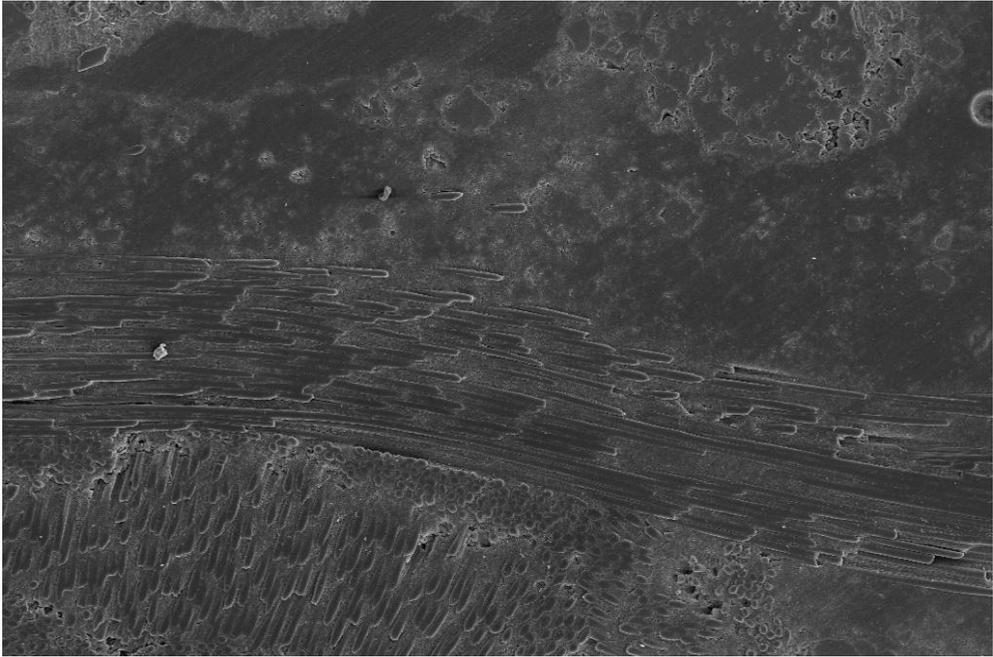


**Figura 19 Fibras de PP, matriz de fractura, interfase y poros**



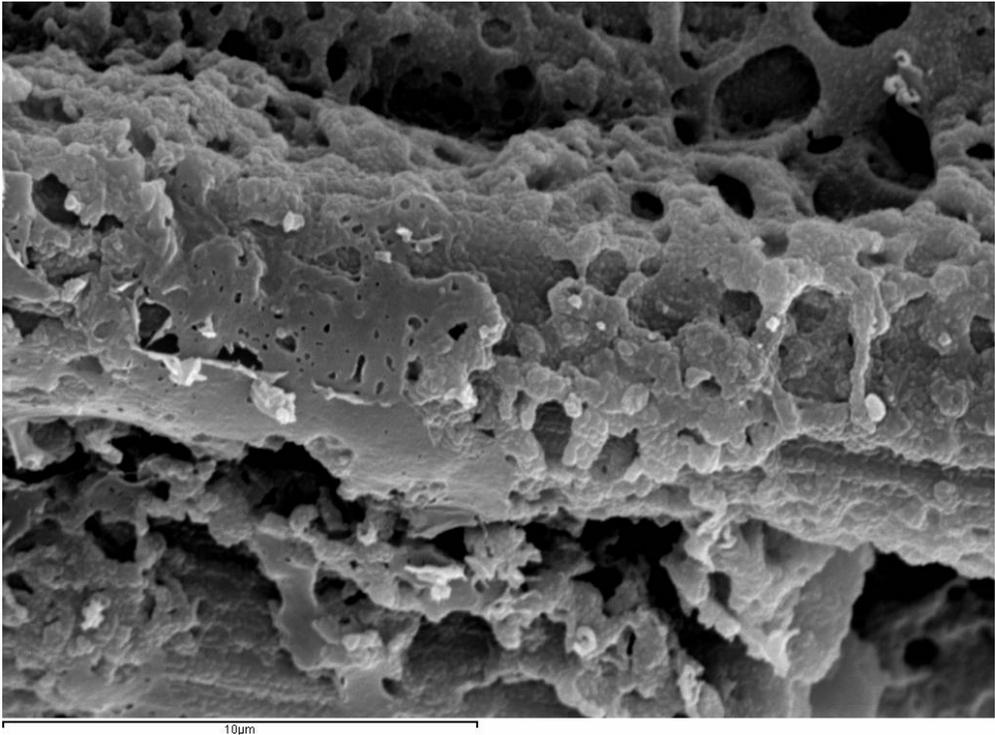
**Figura 20 Ampliación fibras de PP, matriz de fractura, interfase y poros**

En la figura siguiente (Fig. 21) se observa una sección de fibras de polipropileno, bien alineadas, con una interfase limpia con el cemento. Por otro lado, no se encuentran áridos en la zona cercana a las fibras (probablemente por el buen mojado de las fibras), hecho que se repetirá más adelante (véase Fig. 27), y que supone una ventaja de cara al efecto positivo de las fibras en el posterior *spalling* por una menor nucleación de grietas.



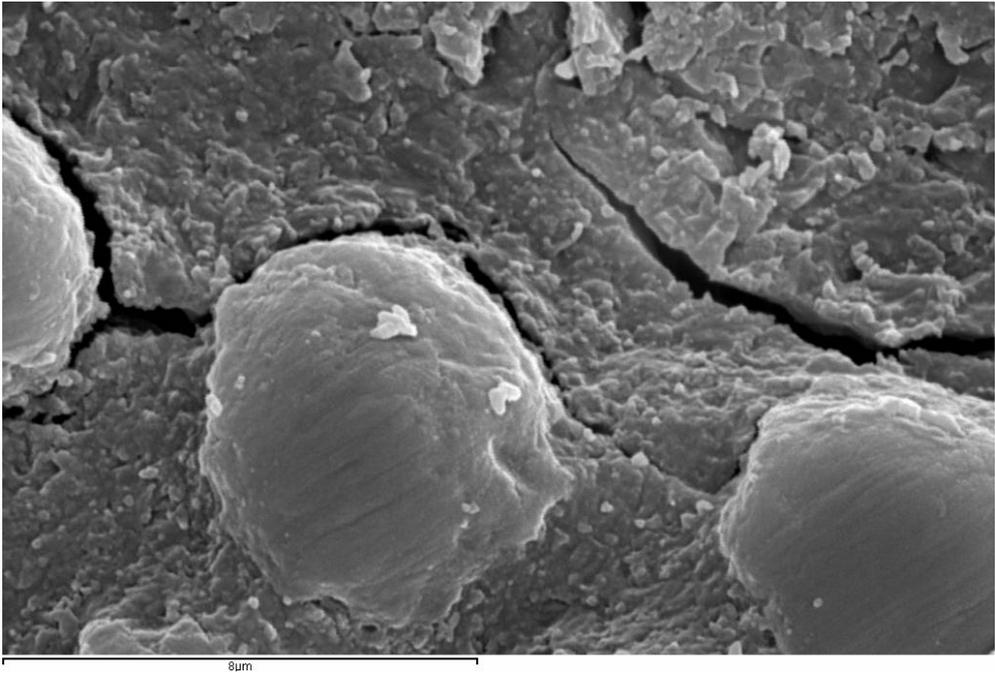
**Figura 21 Sección de fibras de PP en contacto con la interfase**

Seguidamente, la figura 22 muestra una fibra metálica con muy buena adhesión a la matriz (reforzando la hipótesis de buena mojabilidad de las fibras con el cemento), aunque también hay poros generados por aire ocluido. Esto se sabe debido a que la geometría de los poros es muy regular y redondeada.



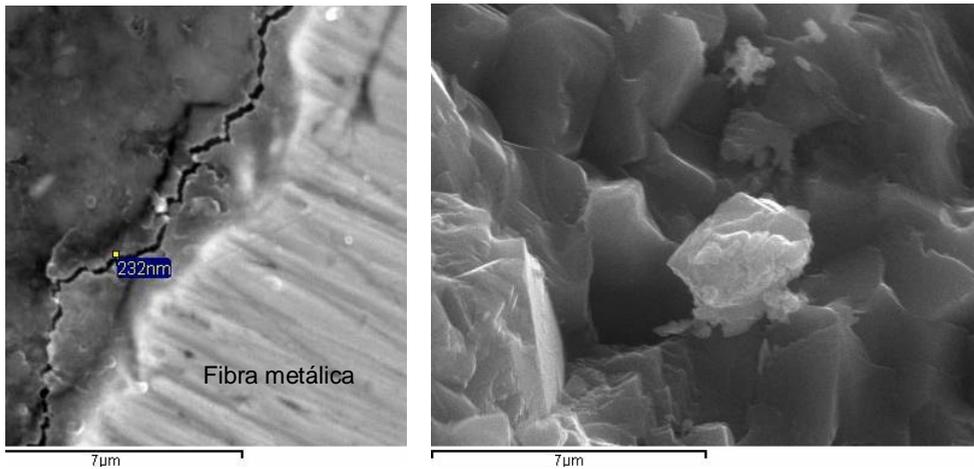
**Figura 22 Fibra metálica con muy buena adhesión a la matriz**

A continuación, en la figura 23 se muestra la fractura de la matriz siguiendo transversalmente las fibras metálicas debido al efecto *spalling*. Esto es debido a que la fractura aparece en el elemento más frágil, la matriz, y además progresa por el punto más débil. Dicho punto es el entorno de las fibras en el que hay tensiones más elevadas pero menos sección de hormigón resistente, por lo que presenta menos resistencia. Además se verifica de nuevo la falta de nucleación heterogénea de grietas por los áridos en contacto directo con la fibra.



**Figura 23 Fractura de la matriz junto a fibras metálicas**

Las siguientes dos figuras muestran el efecto del fenómeno spalling representado, en la figura 24, como una fractura en la interfase entre la matriz (dcha.) y una fibra metálica (izda.).



**Figura 24** Fractura en la interfase y superficie con fractura frágil, respectivamente

A continuación, se muestra una superficie de fractura provocada por el fenómeno *spalling* en la interfase (véase Figura 25) y, micro-grietas provocadas por el mismo fenómeno en la figura 26. Además, en ésta última también se observan interconexiones creadas por la evaporación de vapor de agua, y a la derecha, un posible canal creado a partir de la fusión de una fibra de polipropileno.

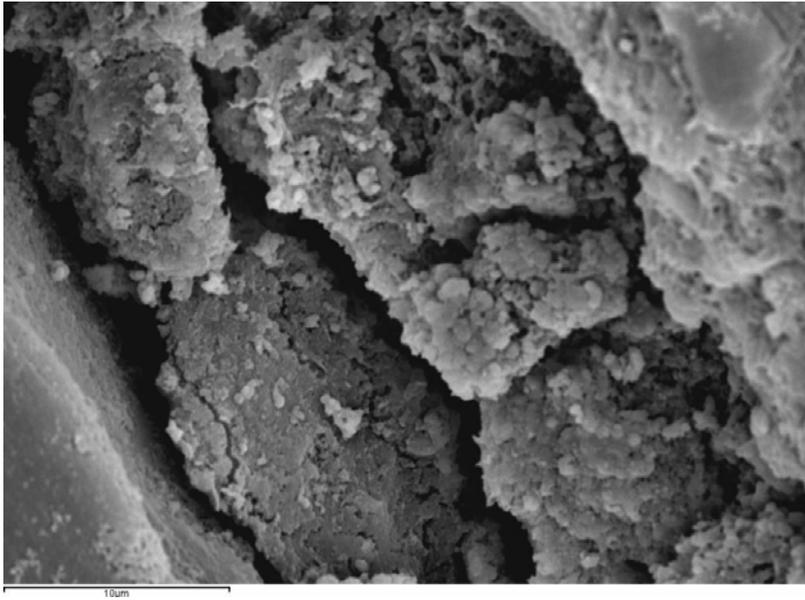


Figura 25 fractura provocada por el fenómeno *spalling* en la interfase

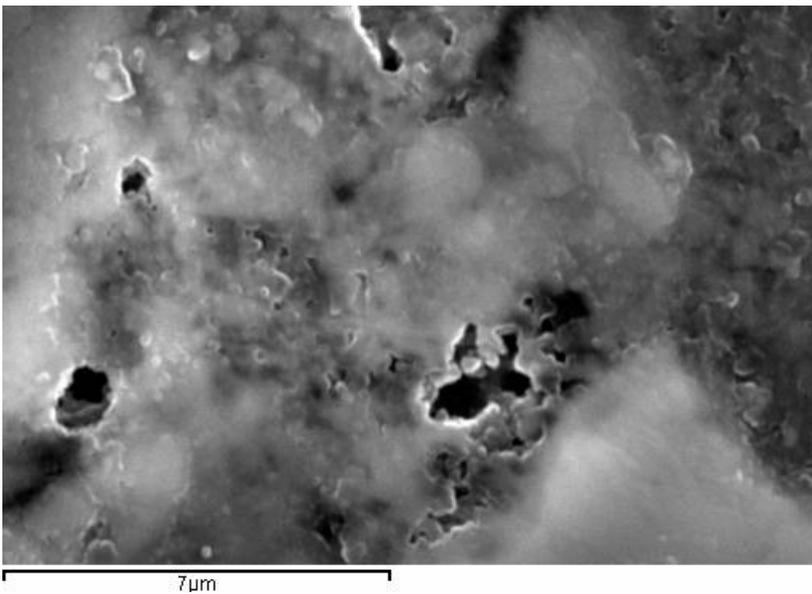


Figura 26 Micro-grietas creadas por el fenómeno *spalling*, interconexiones creadas por la evaporación de vapor de agua y, canal dejado por la fusión de PP

Seguidamente, en la Figura 27 se tiene una fibra metálica arrancada, es decir, que ha perdido la adherencia y falla por tracción. Además, también puede apreciarse que no hay áridos gruesos en la zona próxima a la fibra, tal y como se ha mencionado con anterioridad en este apartado (véase Fig. 21).

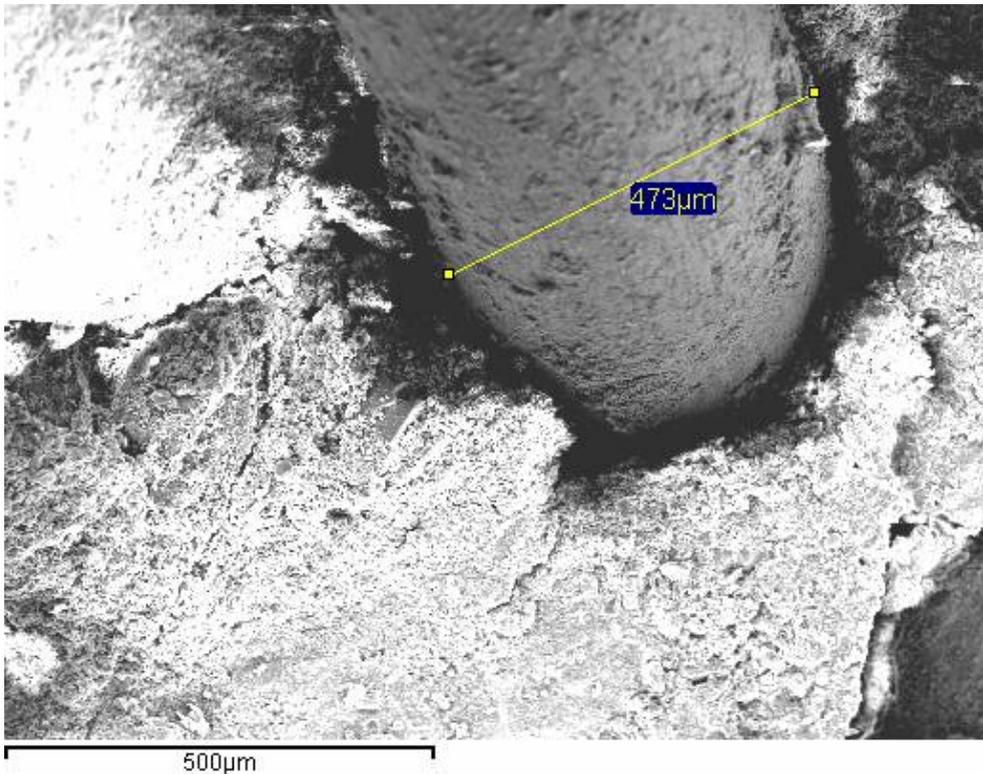
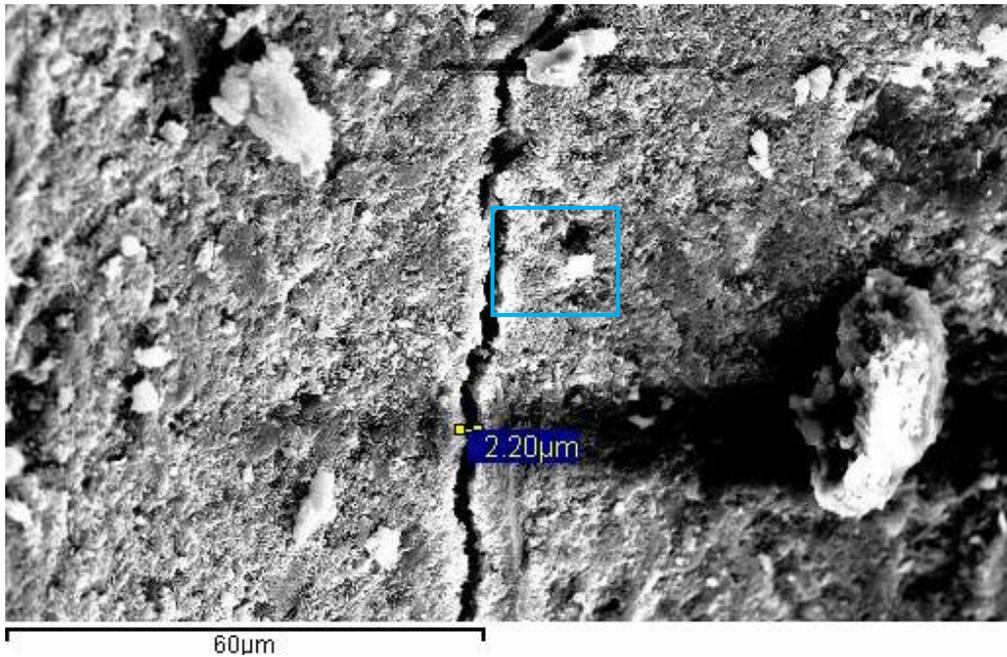


Figura 27 Arranque de fibra metálica

Por último, también hay grietas creadas por el fenómeno del *spalling* que no aparecen siguiendo una guía de fibras metálicas como se ha visto en otras imágenes, si no que aparecen en la matriz (véase Fig. 28). El crecimiento de estas grietas es ralentizado debido al trabajo de retención llevado a cabo por las fibras metálicas.

Por otra parte, comparando el ancho de la grieta ( $2,20\ \mu\text{m}$ ) con la proyección del diámetro de la fibra ( $473\ \mu\text{m}$ ) o con el diámetro real de la fibra ( $750\ \mu\text{m}$ ) se valora que el ancho de la grieta es aproximadamente 277 veces inferior al ancho de la fibra. Lo que justifica la correcta selección de las dimensiones de las fibras para las condiciones de fractura presentes.



**Figura 28** Grieta creada por el fenómeno *spalling*

Por otra parte, observando un aumento de la imagen anterior marcado con un recuadro azul claro (véase Fig. 29), se evalúan zonas de la grieta que son todavía más pequeñas, por lo que la diferencia en relación al ancho de la fibra aumenta. Esto verifica el comportamiento adecuado de la fibra como refuerzo.

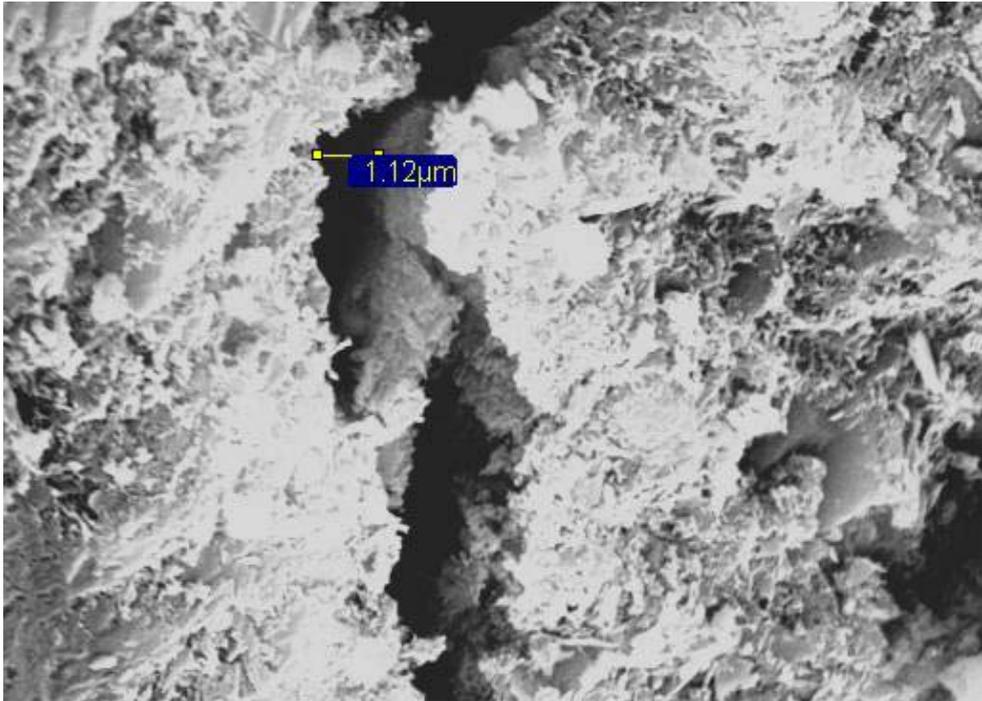


Figura 29 Ampliación grieta creada por el fenómeno *spalling*



## 6 Ensayos frente al fuego

### 6.1 Introducción

Como se ha explicado anteriormente, para determinar las propiedades que posee el hormigón una vez sometido a diferentes ciclos de elevadas temperaturas: 20°C, 100°C, 160°C, 240°C, 320°C y 400°C, se han realizado ensayos mecánicos tales como flexión a tres puntos, ensayo de doble punzonamiento o ensayo Barcelona y, emisión acústica.

Las probetas utilizadas para la realización de dichos ensayos se sometieron a los ciclos de temperatura anteriormente citados, durante dos horas en un horno. El objetivo era asegurar que la temperatura llegase al límite establecido en cada caso, tanto en la periferia como en el interior de

las probetas. Una vez alcanzada la temperatura deseada, éstas fueron extraídas del horno y ensayadas inmediatamente. A continuación se expone el funcionamiento teórico de cada uno de estos ensayos, así como los resultados obtenidos.

## 6.2 Ensayo de doble punzonamiento (Barcelona)

### 6.2.1 Fundamento

El ensayo de doble punzonamiento o ensayo Barcelona fue presentado e ideado por Chen (1970). Se presentó como alternativa al ensayo brasileño, con el objetivo de determinar la resistencia a la tracción indirecta del hormigón. Su uso generalizado en el hormigón reforzado con fibras (FRC), junto con la necesidad de ensayos capaces de estimar propiedades tales como la tenacidad, ductilidad y características post-pico, ha hecho que el ensayo de doble punzonamiento sea competitivo frente a otros ensayos habituales utilizados con hormigones reforzados con fibras como el ensayo a flexotracción. Además de que presenta otra serie de ventajas, tal y como se muestra en este capítulo [9].

En este ensayo, se dispone de una probeta vertical y cilíndrica, de 15x15 cm, de hormigón dispuesta entre las placas de carga a compresión uniaxial, haciendo uso de dos punzones circulares de acero dispuestos de manera concéntrica encima y debajo de la probeta a ensayar. En la figura siguiente (Fig. 30) se muestra un esquema básico del ensayo [37], [38], [39].

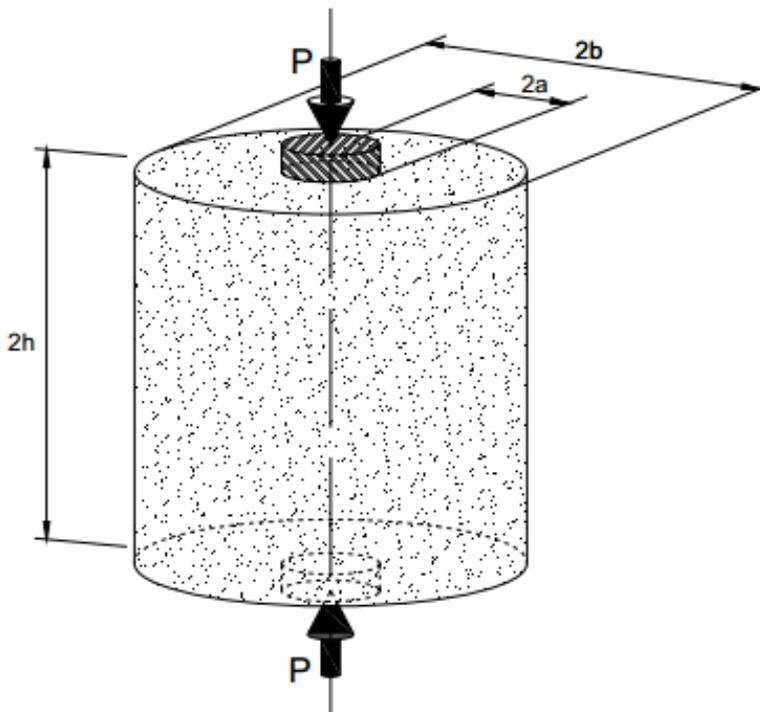


Figura 30 Esquema básico del ensayo de doble punzonamiento [38]

Esta carga concentrada en un área delimitada se transmite a la probeta produciendo un incremento de la tracción sobre los planos que contienen el eje del cilindro, y la probeta se fractura a lo largo de estos planos. Suelen aparecer tres fisuras radiales, aunque se puede dar el caso de que aparezcan dos o cuatro fisuras. La formación de los planos de fisura radiales empieza con la aparición de una primera fisura radial. El estado de tensiones que produce la rotura, en la incipiente formación de dicha fisura, corresponde al valor último de la carga  $P$ , alcanzándose de esta manera el límite de resistencia a tracción. Las fisuras surgen en el centro del cilindro y progresan hasta la cara exterior del mismo. En la figura 31 se muestra el mecanismo de rotura.

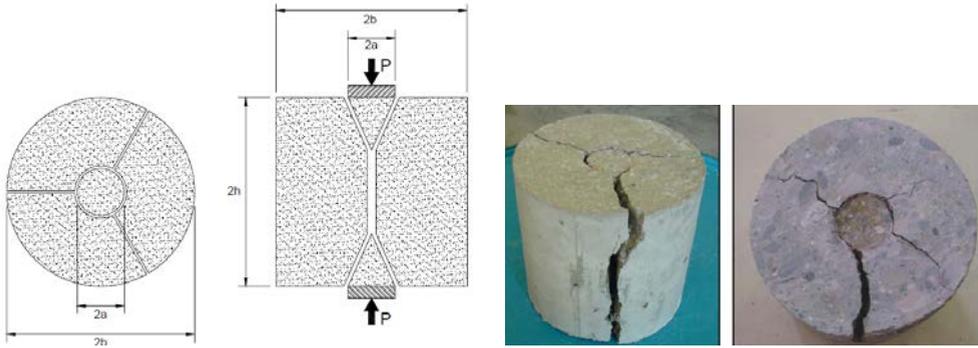


Figura 31 Mecanismo idealizado de rotura en el que se muestra la vista en planta y una sección transversal [37]

Bajo la carga de rotura, se forman dos cuñas situadas bajo los punzones. Dichas cuñas se asimilan a dos conos circulares que penetran dentro del cilindro. Este comportamiento conlleva a un desplazamiento lateral de los segmentos de hormigón separados por fisuras radiales. En la siguiente figura (Fig. 32) se muestran desglosados los dos tipos de superficies de rotura que aparecen al ensayar la probeta hasta rotura [37].

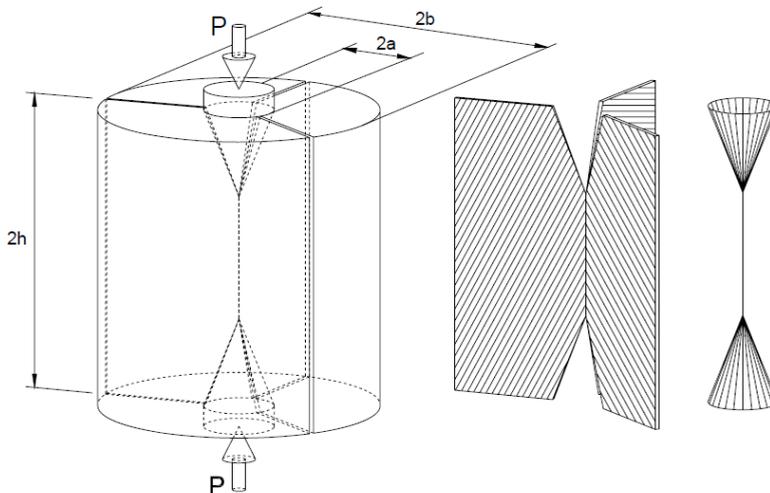


Figura 32 Esquema idealizado del modo de rotura donde se puede observar la formación de los planos radiales y de los conos de rotura [37]

La rotura de la probeta tiene lugar cuando la resistencia del hormigón es sobrepasada por el estado tensional, controlando la carga aplicada y su velocidad de aplicación. La tensión media de la probeta en el ensayo puede determinarse mediante la ecuación [39]:

$$f_{dp} = \frac{p}{\pi \cdot (1,2 \cdot L \cdot D - r^2)}$$

donde

$f_{dp}$ : tensión media calculada en el ensayo de doble punzonamiento.

r: radio de la placa de carga.

L: altura de la probeta.

D: diámetro de la probeta.

Dicha rotura puede acontecer de dos formas distintas, por deslizamiento y por separación. La rotura por deslizamiento tiene lugar en las superficies comprendidas entre los fragmentos cónicos y los segmentos de hormigón exteriores y, la rotura por separación tiene lugar en las superficies radiales fisuradas entre los segmentos de hormigón exteriores. Inicialmente se forman las fisuras radiales (rotura de separación) siendo la secuencialidad en la aparición de dichas fisuras prácticamente instantánea en el tiempo. En segundo lugar se produce la rotura por deslizamiento, ya que para que el cono formado bajo los platos de carga pueda desplazarse necesita físicamente de la aparición de las fisuras radiales. La norma que rige este ensayo es la UNE 83515:2010,2010.

Seguidamente se presentan una serie de ventajas que posee el ensayo de doble punzonamiento frente a otros ensayos utilizados para determinar la resistencia a tracción [38], [39]:

- La prensa necesaria para realizar el ensayo es una prensa convencional (la utilizada en rotura a compresión) y, el procedimiento a seguir para la ejecución del ensayo es sencillo.
- La carga requerida para la rotura de la probeta es reducida, por lo que es necesario una prensa de menor capacidad en comparación con otros ensayos.
- La rotura de la muestra se produce en varios planos, permitiendo establecer una resistencia promedio a la tracción a partir de una mayor superficie. De esta forma se reduce la dispersión en los resultados.
- Se requiere una probeta de menor volumen en comparación con otros métodos de ensayo. Esto se traduce en una menor incidencia en el medioambiente, además de facilitar la manipulación de la probeta por parte de los operarios.
- La configuración de la muestra en cilindro presenta la ventaja de permitir la extracción de muestras procedentes de estructuras ya existentes, diversificando el campo de aplicación del ensayo.
- Al aplicar la carga directamente sobre la superficie de las caras de la probeta, se reduce el tiempo de preparación de las mismas y también elimina el uso de mortero de azufre.

### 6.3 Resultados del ensayo de doble punzonamiento

Los resultados obtenidos en el ensayo de doble punzonamiento se muestran en la tabla siguiente (Tab. 8), donde también se adjuntan los parámetros:

- Número de la probeta (probeta).
- Relación agua/cemento (A/C).
- Cantidad y tipo de fibras ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- Ciclos de temperatura ( $T^a$ ).
- Carga máxima alcanzada (kN).

Cabe remarcar que cada valor de carga máxima alcanzada y alargamiento máximo ha sido obtenido a partir de la media aritmética de los resultados del ensayo de tres probetas.

**Tabla 8 Resultados ensayo de doble punzonamiento**

Probeta	A/C	REFUERZO	Kg/m <sup>3</sup>	T (°C)	Cmax (kN)
1	0,4	Metal	20	20	180
2	0,4	Metal	20	100	179
3	0,4	Metal	20	160	165
4	0,4	Metal	20	240	32
5	0,4	Metal	20	320	22
6	0,4	Metal	20	400	16
7	0,4	PP	3	20	162
8	0,4	PP	3	100	162
9	0,4	PP	3	160	152
10	0,4	PP	3	240	120
11	0,4	PP	3	320	8
12	0,4	PP	3	400	7
13	0,4	FV	4	20	168
14	0,4	FV	4	100	161
15	0,4	FV	4	160	158
16	0,4	FV	4	240	21
17	0,4	FV	4	320	12
18	0,4	FV	4	400	9
19	0,4	-	0	20	175
20	0,4	-	0	100	170
21	0,4	-	0	160	116
22	0,4	-	0	240	21
23	0,4	-	0	320	5
24	0,4	-	0	400	3
25	0,4	Metal/PP	20/3	20	182
26	0,4	Metal/PP	20/3	100	179
27	0,4	Metal/PP	20/3	160	168



28	0,4	Metal/PP	20/3	240	56
29	0,4	Metal/PP	20/3	320	35
30	0,4	Metal/PP	20/3	400	32
31	0,5	Metal	20	20	164
32	0,5	Metal	20	100	159
33	0,5	Metal	20	160	145
34	0,5	Metal	20	240	28
35	0,5	Metal	20	320	20
36	0,5	Metal	20	400	15
37	0,5	PP	3	20	141
38	0,5	PP	3	100	138
39	0,5	PP	3	160	132
40	0,5	PP	3	240	108
41	0,5	PP	3	320	7
42	0,5	PP	3	400	6
43	0,5	FV	4	20	143
44	0,5	FV	4	100	138
45	0,5	FV	4	160	142
46	0,5	FV	4	240	18
47	0,5	FV	4	320	11
48	0,5	FV	4	400	8
49	0,5	-	0	20	151
50	0,5	-	0	100	155
51	0,5	-	0	160	104
52	0,5	-	0	240	18
53	0,5	-	0	320	4
54	0,5	-	0	400	3
55	0,5	Metal/PP	20/3	20	203
56	0,5	Metal/PP	20/3	100	201
57	0,5	Metal/PP	20/3	160	190
58	0,5	Metal/PP	20/3	240	74
59	0,5	Metal/PP	20/3	320	57
60	0,5	Metal/PP	20/3	400	57
61	0,6	Metal	20	20	140

62	0,6	Metal	20	100	145
63	0,6	Metal	20	160	130
64	0,6	Metal	20	240	26
65	0,6	Metal	20	320	16
66	0,6	Metal	20	400	12
67	0,6	PP	3	20	131
68	0,6	PP	3	100	126
69	0,6	PP	3	160	109
70	0,6	PP	3	240	89
71	0,6	PP	3	320	6
72	0,6	PP	3	400	5
73	0,6	FV	4	20	123
74	0,6	FV	4	100	122
75	0,6	FV	4	160	114
76	0,6	FV	4	240	15
77	0,6	FV	4	320	9
78	0,6	FV	4	400	7
79	0,6	-	0	20	133
80	0,6	-	0	100	138
81	0,6	-	0	160	86
82	0,6	-	0	240	17
83	0,6	-	0	320	4
84	0,6	-	0	400	2
85	0,6	Metal/PP	5/3	20	159
86	0,6	Metal/PP	5/3	100	160
87	0,6	Metal/PP	5/3	160	146
88	0,6	Metal/PP	5/3	240	32
89	0,6	Metal/PP	5/3	320	14
90	0,6	Metal/PP	5/3	400	12

A partir de los resultados de estos ensayos se han elaborado un conjunto de gráficos con el fin de encontrar los parámetros límite en el comportamiento del hormigón reforzado con fibras sometido a ciclos de temperatu-

ra. Se han tenido en cuenta dichos ciclos de temperatura, el material y la cantidad de las fibras, sinergia entre las mismas, etc. A continuación se adjuntan los gráficos resultantes.

Primeramente se ha comparado la resistencia, para las diferentes temperaturas, en función de la relación agua/cemento para el mismo tipo de fibra. Así, para el caso de la fibra metálica se observa que la carga máxima se obtiene para una relación A/C de 0,4. Por otro lado, la pérdida de propiedades se produce, para las tres relaciones A/C, notablemente entre los 160°C y los 240°C, reduciéndose la carga máxima de 165 a 32 kN.

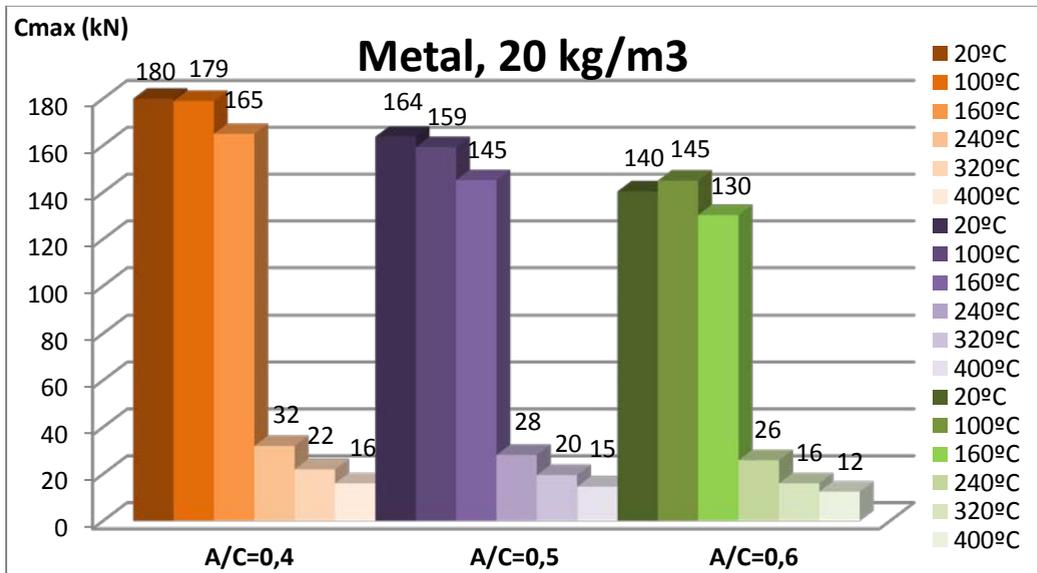


Figura 33 Cmax-A/C para fibra metálica

En el caso de la mezcla con fibras de PP también se obtiene la carga máxima para la relación de A/C=0,4. Sin embargo, respecto a la pérdida de propiedades pueden observarse dos puntos de interés. El primero se da entre los 160°C y los 240°C donde puede apreciarse una pequeña pérdida de propiedades, de 152 a 120 kN, y el segundo entre los 240°C y los

320°C donde la pérdida de propiedades es notablemente más diferenciada, pues se reduce de 120 a 8 kN.

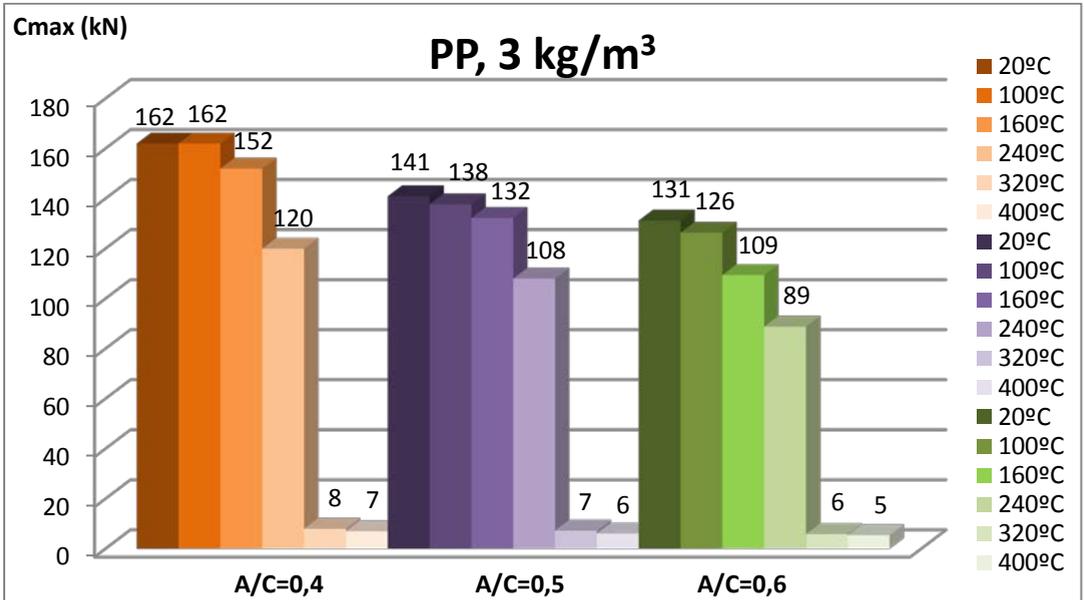


Figura 34 Cmax-A/C para fibra de polipropileno

Para la fibra de vidrio también se obtiene la carga máxima para la relación A/C=0,4, al igual que en la fibra metálica aunque con valores algo inferiores, ya que para fibra metálica la carga máxima es de 180 kN y para la fibra de vidrio es de 168 kN. La pérdida de propiedades es significativa y se produce entre los 160°C y 240°C, pasando de 158 a 21 kN.

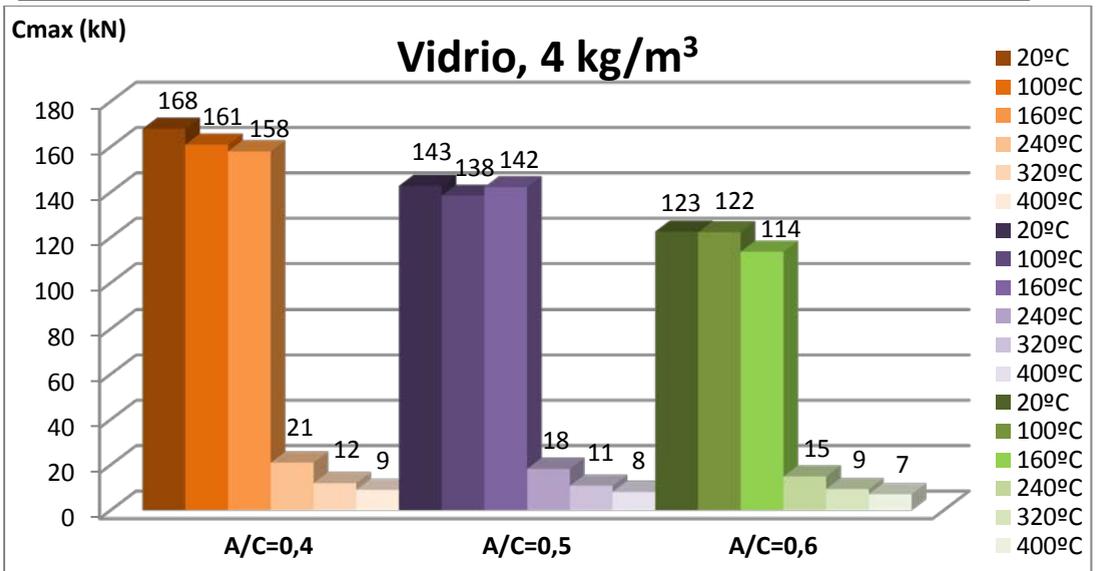


Figura 35 Cmax-A/C para fibra de vidrio

En el caso del hormigón sin refuerzo la máxima carga se obtiene para la relación  $A/C=0,4$ . Por otra parte, respecto a la pérdida de propiedades pueden observarse dos puntos de interés, al igual que para las fibras de PP, aunque en este caso más significativos. El primer punto se produce entre los 160°C y los 240°C donde la pérdida de propiedades es notable, de 170 a 116 kN. En el segundo punto, entre los 240°C y los 320°C, también se produce una pérdida significativa de propiedades, reduciéndose la carga máxima de 116 a 21 kN.

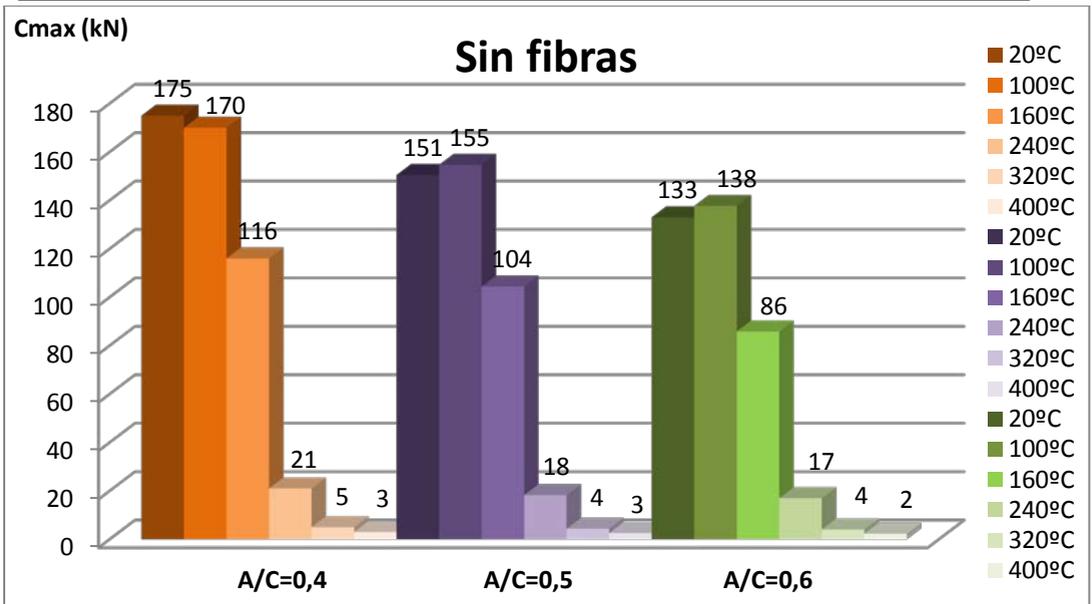


Figura 36 Cmax-A/C para hormigón sin refuerzo

Por último, para el caso de la mezcla de fibras metálicas y de PP, se obtiene, a diferencia de todas las demás, la carga máxima para la relación A/C=0,5. Además, con valores pico superiores, dado que se obtienen 203 kN en comparación con los 180 kN de carga máxima en el caso de fibra metálica. En referencia a la pérdida de propiedades también se producen entre los 160°C y los 240°C, reduciéndose de 190 kN a 74 kN.

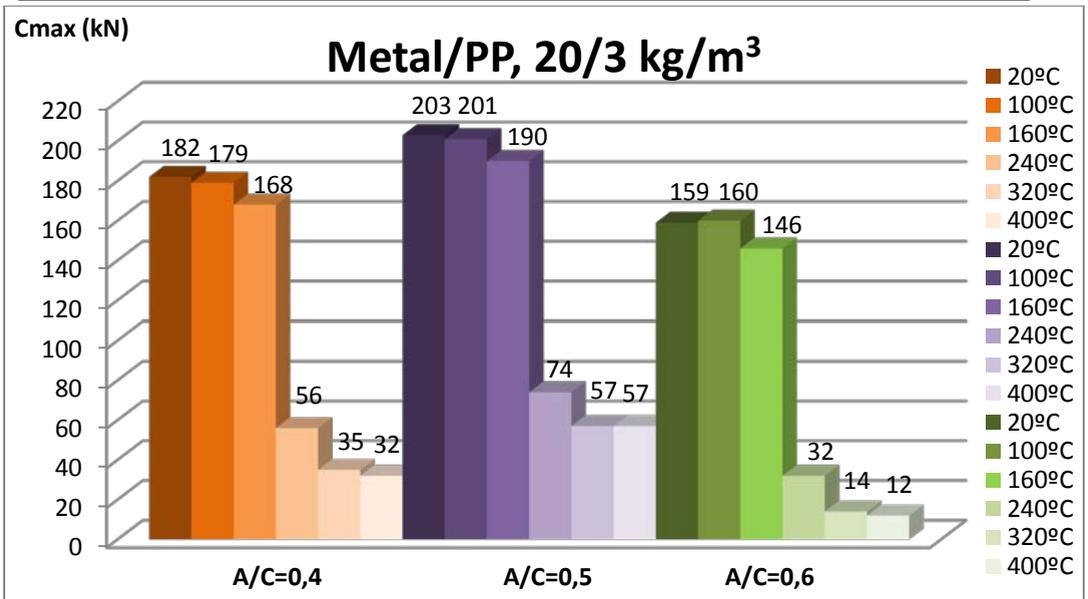


Figura 37 Cmax-A/C para fibra metálica/polipropileno

En segundo lugar, se ha comparado la resistencia, para los diferentes tipos de fibras y temperaturas, manteniendo constante la relación agua/cemento. Como puede observarse en las siguientes figuras (Fig. 38, Fig. 39 y Fig. 40), los máximos valores de carga se obtienen en la mezcla de fibras metálicas y de polipropileno.

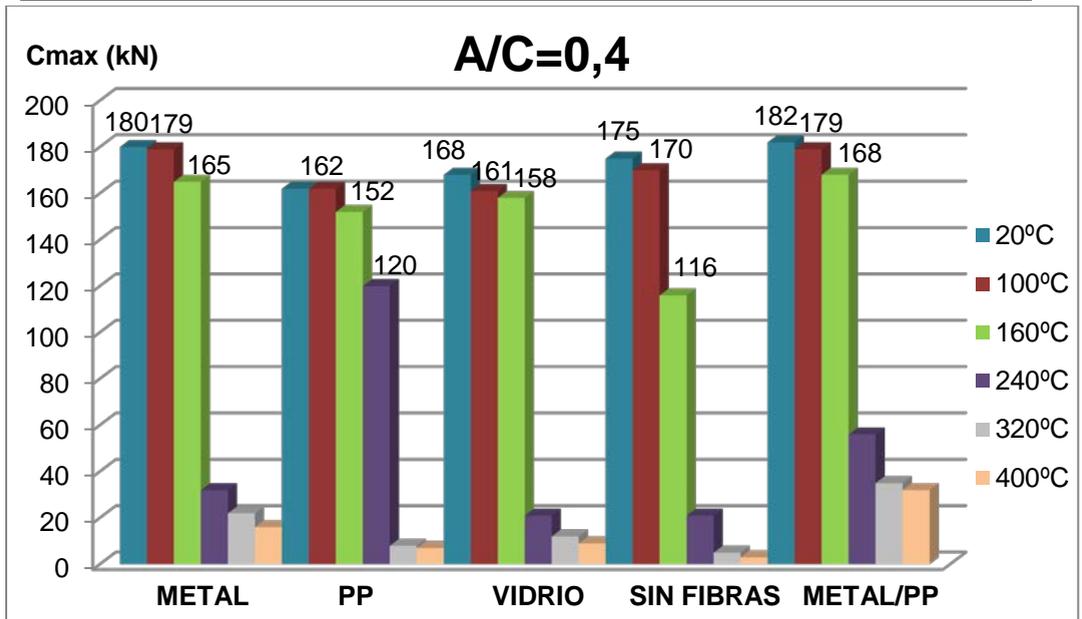


Figura 38 Cmax-Tipo fibra para A/C=0,4

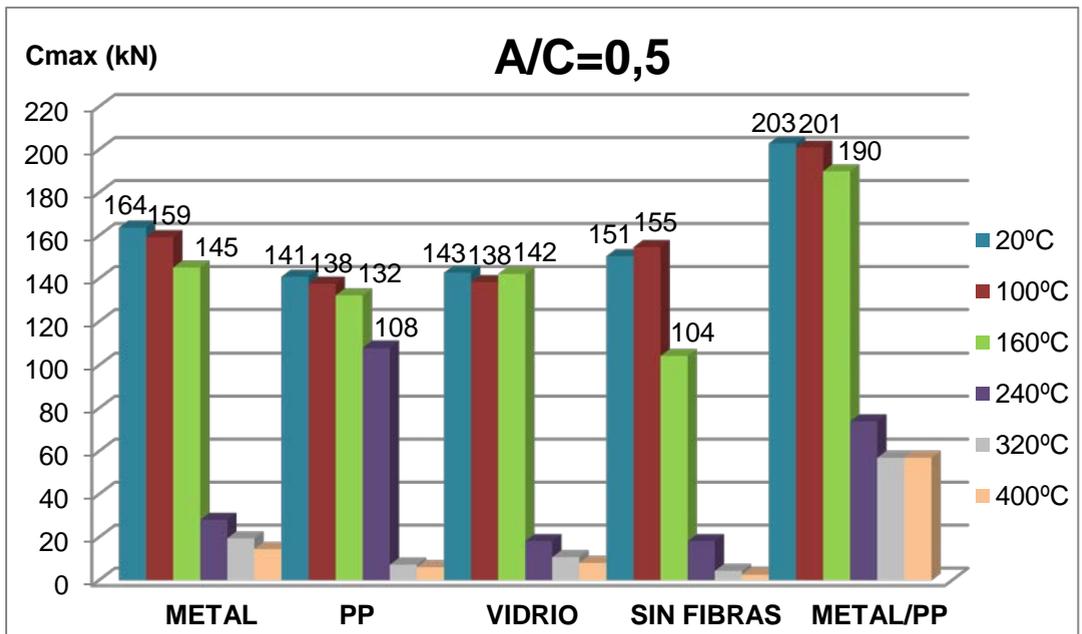


Figura 39 Cmax-Tipo fibra para A/C=0,5

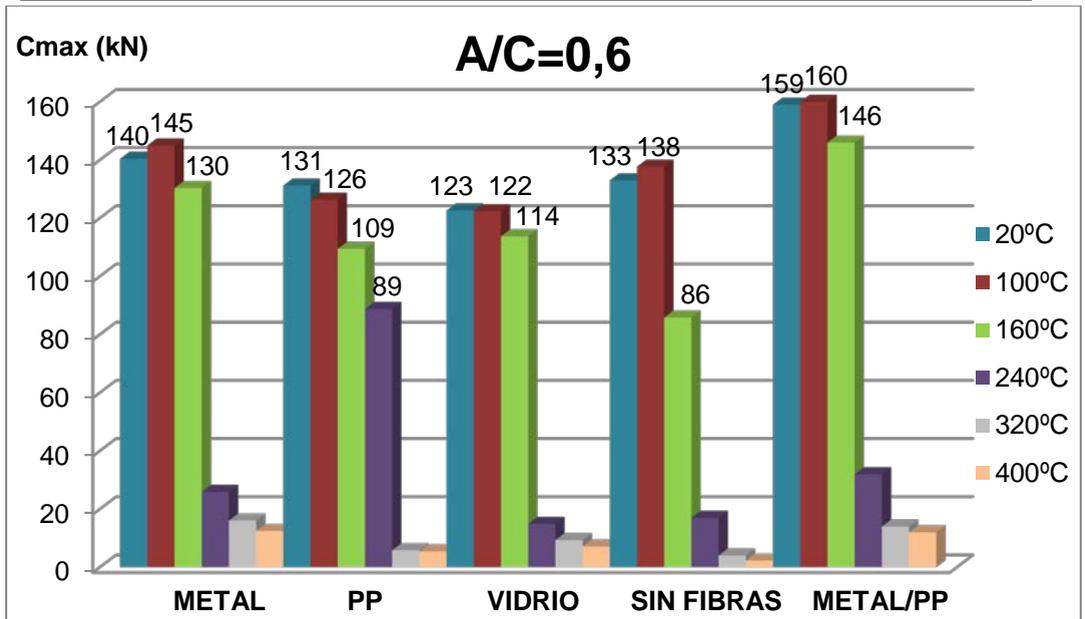


Figura 40 Cmax-Tipo fibra para A/C=0,6

Así pues, puede concluirse que, según el ensayo de doble punzonamiento, la mejor combinación es la de 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra metálica junto a 3 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno y una relación de A/C=0,5, obteniéndose una carga máxima de 203 kN y una mínima de 57 kN.

En tercer lugar, se ha evaluado la energía, que es el área bajo la curva carga-alargamiento. Su valor debe ser mayor como mejor sea el comportamiento frente al *spalling*. Los resultados que se han obtenido se muestran a continuación en la Tabla 9, en la que se incluye:

- Número de la probeta (probeta).
- Relación agua/cemento (A/C).
- Cantidad y tipo de fibras (kg/m<sup>3</sup>).
- Ciclos de temperatura (T<sup>a</sup>).
- Carga máxima (kN).
- Energía potencial (J).

**Tabla 9 Resultados ensayo doble punzonamiento (2)**

Probeta	A/C	REFUERZO	Kg/m <sup>3</sup>	T (°C)	Cmax (kN)	Ep (J)
1	0,4	Metal	20	20	180	3,60
2	0,4	Metal	20	100	179	3,56
3	0,4	Metal	20	160	165	2,96
4	0,4	Metal	20	240	32	1,02
5	0,4	Metal	20	320	22	0,91
6	0,4	Metal	20	400	16	0,89
7	0,4	PP	3	20	162	1,20
8	0,4	PP	3	100	162	1,22
9	0,4	PP	3	160	152	1,15
10	0,4	PP	3	240	120	0,81
11	0,4	PP	3	320	8	0,82
12	0,4	PP	3	400	7	0,81
13	0,4	FV	4	20	168	2,00
14	0,4	FV	4	100	161	1,82
15	0,4	FV	4	160	158	1,83
16	0,4	FV	4	240	21	1,71
17	0,4	FV	4	320	12	0,98
18	0,4	FV	4	400	9	0,79
19	0,4	-	0	20	175	1,10
20	0,4	-	0	100	170	0,92
21	0,4	-	0	160	116	0,21
22	0,4	-	0	240	21	0,11
23	0,4	-	0	320	5	0,12
24	0,4	-	0	400	3	0,13
25	0,4	Metal/PP	20/3	20	182	3,50
26	0,4	Metal/PP	20/3	100	179	3,31
27	0,4	Metal/PP	20/3	160	168	3,09
28	0,4	Metal/PP	20/3	240	56	2,91
29	0,4	Metal/PP	20/3	320	35	2,12
30	0,4	Metal/PP	20/3	400	32	2,03
31	0,5	Metal	20	20	164	3,06

32	0,5	Metal	20	100	159	3,17
33	0,5	Metal	20	160	145	2,69
34	0,5	Metal	20	240	28	0,91
35	0,5	Metal	20	320	20	0,78
36	0,5	Metal	20	400	15	0,79
37	0,5	PP	3	20	141	1,06
38	0,5	PP	3	100	138	1,09
39	0,5	PP	3	160	132	1,02
40	0,5	PP	3	240	108	0,72
41	0,5	PP	3	320	7	0,75
42	0,5	PP	3	400	6	0,69
43	0,5	FV	4	20	143	1,78
44	0,5	FV	4	100	138	1,55
45	0,5	FV	4	160	142	1,56
46	0,5	FV	4	240	18	1,52
47	0,5	FV	4	320	11	0,89
48	0,5	FV	4	400	8	0,70
49	0,5	-	0	20	151	1,00
50	0,5	-	0	100	155	0,79
51	0,5	-	0	160	104	0,19
52	0,5	-	0	240	18	0,09
53	0,5	-	0	320	4	0,11
54	0,5	-	0	400	3	0,12
55	0,5	Metal/PP	20/3	20	203	3,50
56	0,5	Metal/PP	20/3	100	201	3,31
57	0,5	Metal/PP	20/3	160	190	3,09
58	0,5	Metal/PP	20/3	240	74	2,91
59	0,5	Metal/PP	20/3	320	57	2,12
60	0,5	Metal/PP	20/3	400	57	2,03
61	0,6	Metal	20	20	140	2,66
62	0,6	Metal	20	100	145	2,56
63	0,6	Metal	20	160	130	2,34
64	0,6	Metal	20	240	26	0,79
65	0,6	Metal	20	320	16	0,68

66	0,6	Metal	20	400	12	0,69
67	0,6	PP	3	20	131	0,85
68	0,6	PP	3	100	126	0,89
69	0,6	PP	3	160	109	0,90
70	0,6	PP	3	240	89	0,60
71	0,6	PP	3	320	6	0,59
72	0,6	PP	3	400	5	0,58
73	0,6	FV	4	20	123	1,56
74	0,6	FV	4	100	122	1,29
75	0,6	FV	4	160	114	1,37
76	0,6	FV	4	240	15	1,30
77	0,6	FV	4	320	9	0,78
78	0,6	FV	4	400	7	0,59
79	0,6	-	0	20	133	0,81
80	0,6	-	0	100	138	0,66
81	0,6	-	0	160	86	0,16
82	0,6	-	0	240	17	0,09
83	0,6	-	0	320	4	0,09
84	0,6	-	0	400	2	0,10
85	0,6	Metal/PP	5/3	20	159	3,50
86	0,6	Metal/PP	5/3	100	160	3,31
87	0,6	Metal/PP	5/3	160	146	3,09
88	0,6	Metal/PP	5/3	240	32	2,91
89	0,6	Metal/PP	5/3	320	14	2,12
90	0,6	Metal/PP	5/3	400	12	2,03

A partir de estos resultados se han elaborado un conjunto de gráficos con el fin de determinar qué relación agua/cemento, cantidad de fibras, etc. es la óptima desde el punto de vista de la energía. Así pues, podrá compararse el resultado con el obtenido anteriormente.

Primeramente se ha comparado la energía, para las diferentes temperaturas, en función de la relación agua/cemento para el mismo tipo de fibra, tal y como se ha hecho en el caso de la carga máxima. Así, para el caso

de la fibra metálica se observa que la energía máxima se obtiene para una relación A/C de 0,4. Por otro lado, el descenso notable de energía, para las tres relaciones A/C, se aprecia entre los 160°C y los 240°C, reduciéndose la energía de 3,60 a 1,02 J, aunque también hay un pequeño descenso entre los 100°C y los 160°C.

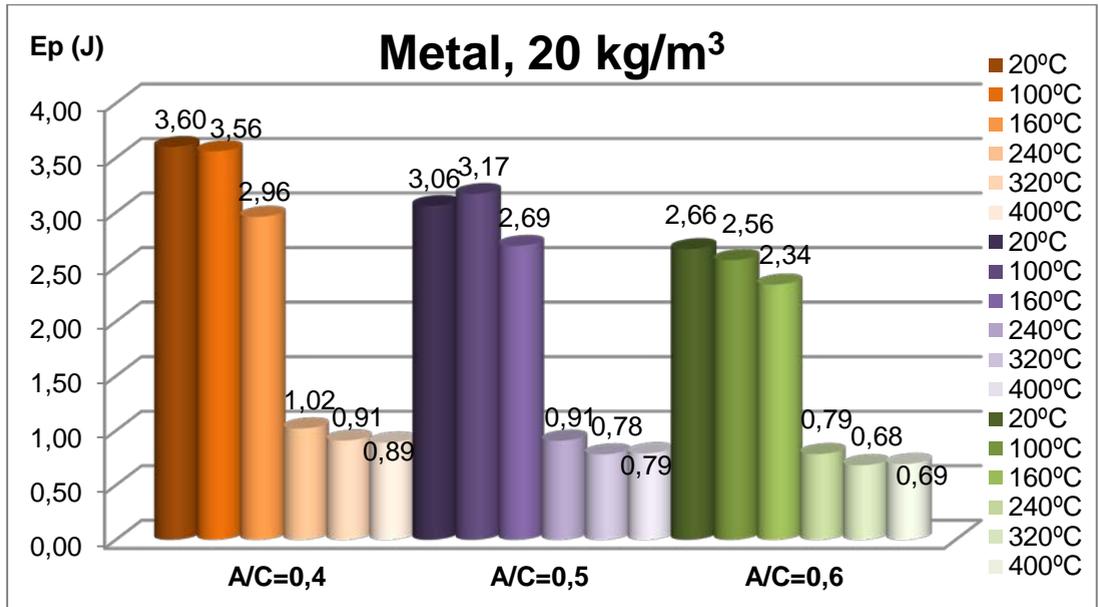


Figura 41 Ep-A/C para fibra metálica

En el caso de la mezcla con fibras de PP también se obtiene la energía máxima para la relación de A/C=0,4. Sin embargo, respecto al descenso de energía, se aprecia entre los 160°C y los 240°C, reduciéndose de 1,15 a 0,81 J. No obstante, la diferencia es menos notable que en el caso anterior.

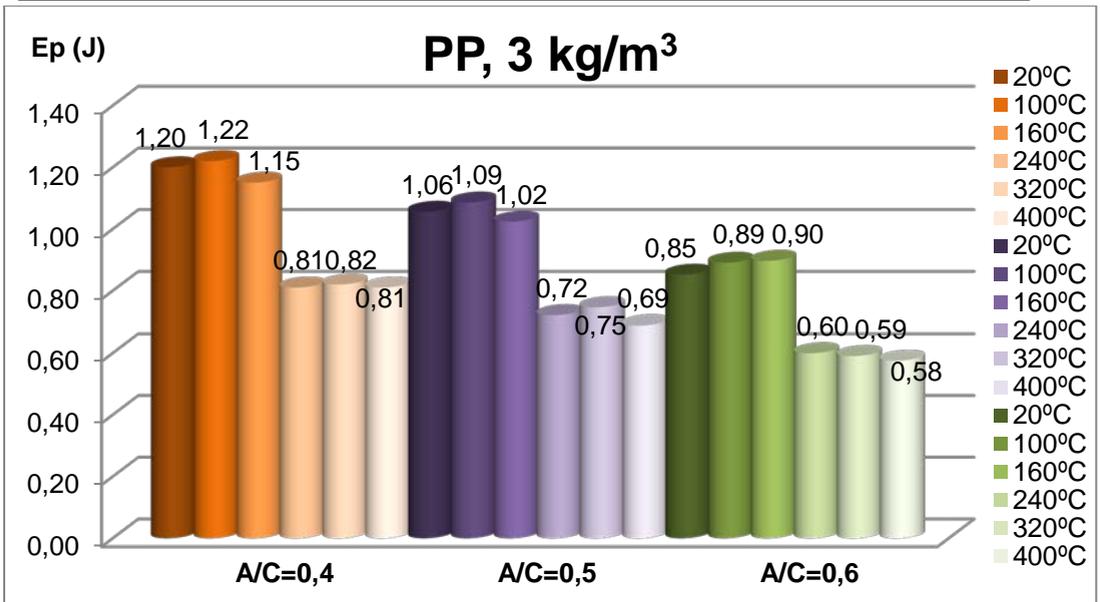


Figura 42 Ep-A/C para fibra de polipropileno

Para la fibra de vidrio también se obtiene la energía máxima para la relación  $A/C=0,4$ , al igual que en la fibra metálica aunque con valores inferiores, ya que para fibra metálica la energía máxima es de 3,60 J y para la fibra de vidrio es de 2,00 J. El descenso de energía más notable se produce entre los 240°C y 320°C, pasando de 1,71 a 0,98 J, aunque también hay un pequeño salto entre los 320°C y los 400°C.

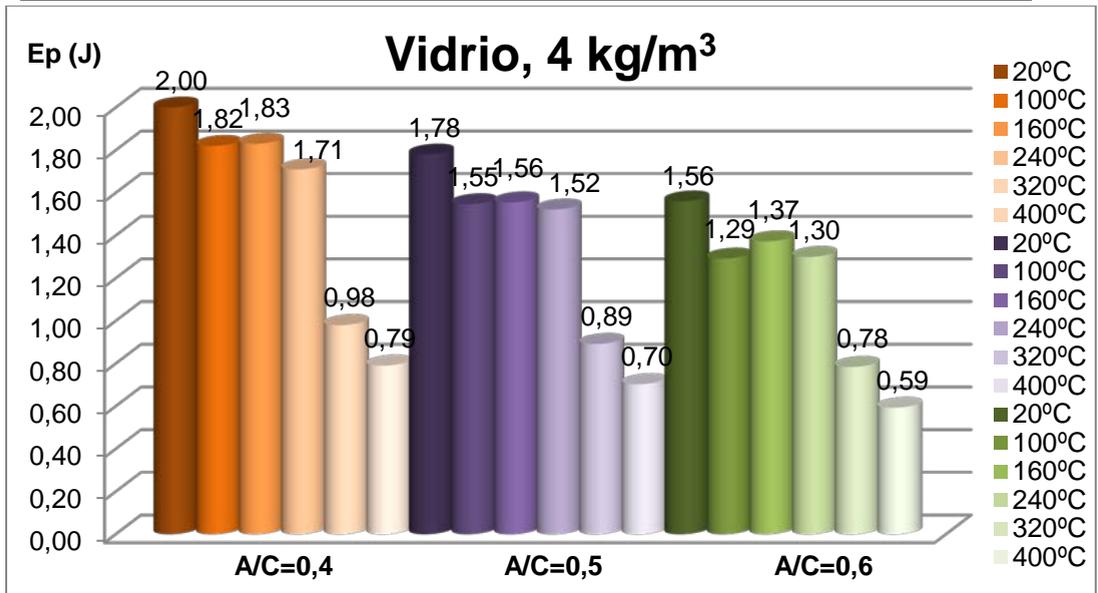


Figura 43 Ep-A/C para fibra de vidrio

En el caso del hormigón sin refuerzo la máxima energía se obtiene para la relación A/C=0,4. Por otra parte, respecto al descenso de la energía pueden observarse tres puntos de interés. El primer punto se produce entre los 20°C y los 100°C donde hay un pequeño descenso energético, de 1,10 a 0,92 J. En el segundo punto, entre los 100°C y los 160°C, se produce una pérdida significativa de propiedades, reduciéndose de 0,92 a 0,21 J. Por último, en el tercer punto situado entre los 160°C y los 240°C hay otro pequeño descenso energético, ya que se reduce de 0,21 a 0,10 J.

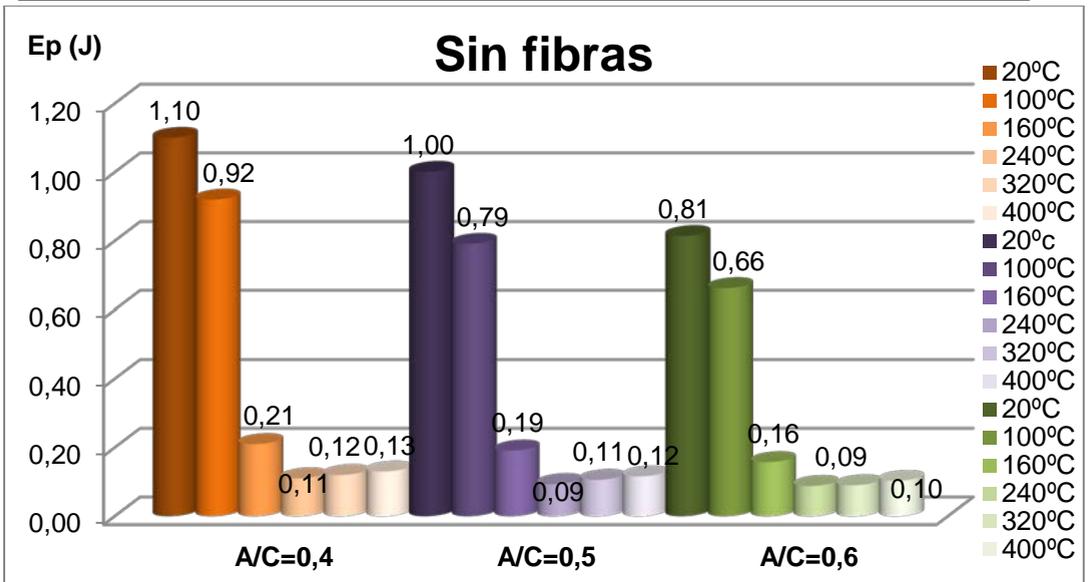


Figura 44 Ep-A/C para hormigón sin refuerzo

Por último, en el caso de la mezcla de fibras metálicas y de PP, se obtiene la misma energía máxima para las tres relaciones A/C, aunque su pico de 3,50 J no es el valor máximo de todos los tipos de fibra, ya que la fibra metálica alcanza una energía máxima de 3,60 J. No obstante, se aprecian pequeños descensos entre los 20°C y los 240°C, y es entre los 240°C y los 320°C donde el descenso energético es más acusado reduciéndose de 2,91 a 2,12 J. Por otra parte, los valores mínimos de energía son muy superiores a los de las otras fibras. Pues la mezcla de fibras presenta una energía mínima de 2,03 J, mientras que el máximo de la mínima energía del resto de fibras asciende a 0,81 J en fibra metálica, 0,79 J para fibra de polipropileno, 0,79 J en fibra de vidrio y 0,11 J cuando no hay refuerzo.

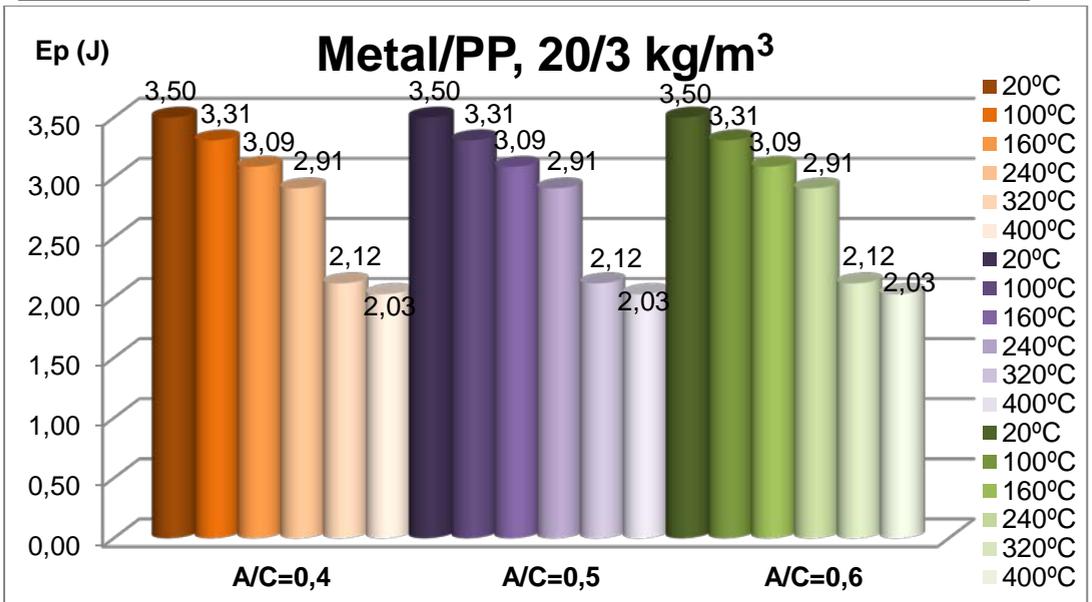


Figura 45 Ep-A/C para fibra metálica/polipropileno

En cuarto lugar, se ha comparado la energía, para los diferentes tipos de fibras y temperaturas, manteniendo constante la relación agua/cemento. Como puede observarse en las Figuras 46, Figura 47 y Figura 48, los valores de energía más altos y constantes se obtienen en la mezcla de fibras metálicas y de polipropileno.

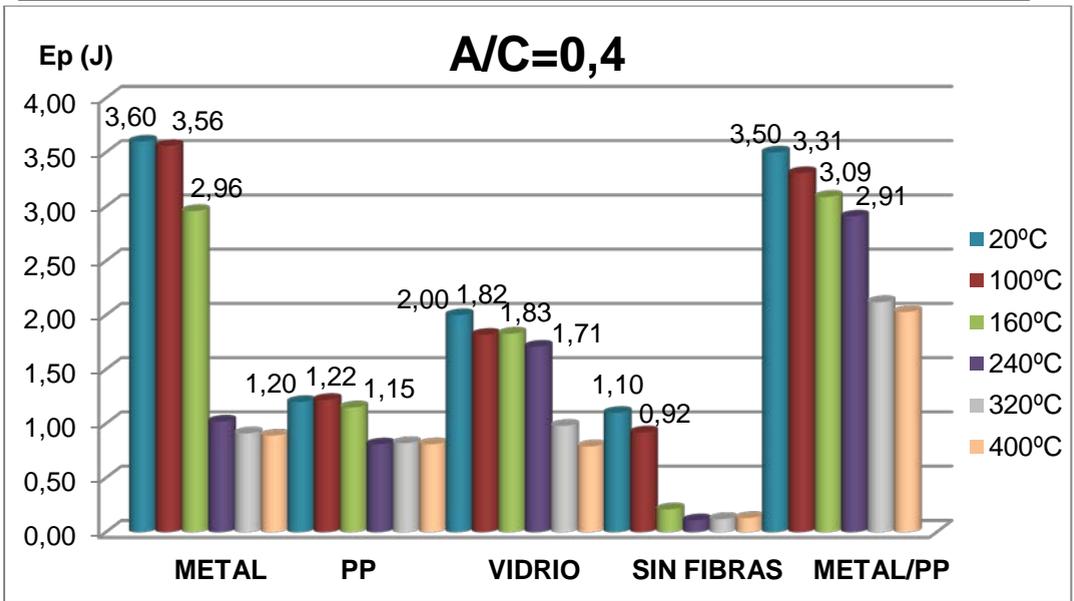


Figura 46 Ep-Tipo fibra para A/C=0,4

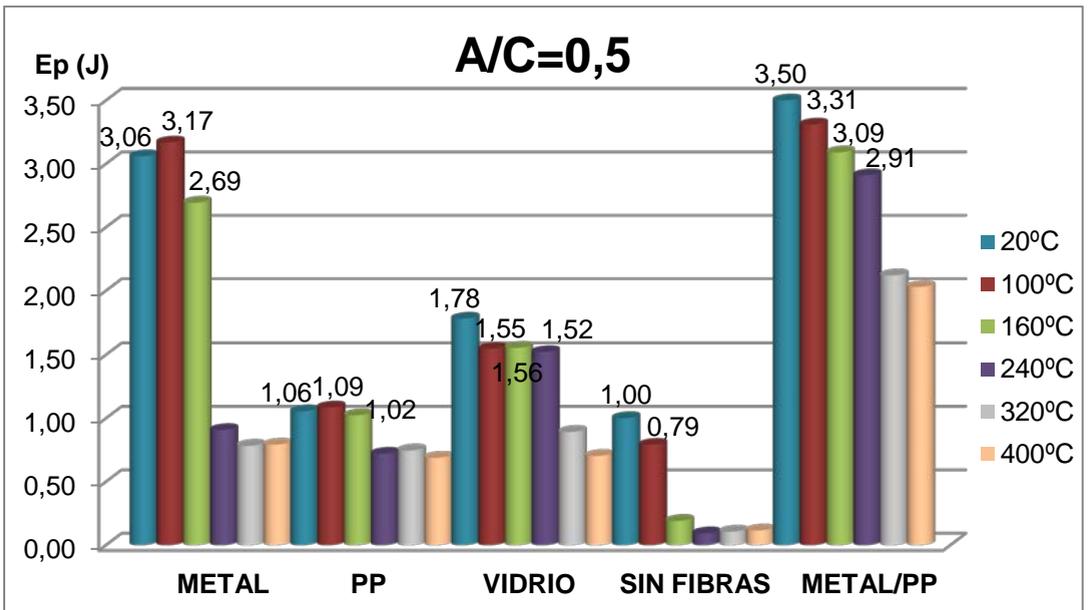


Figura 47 Ep-Tipo fibra para A/C=0,5

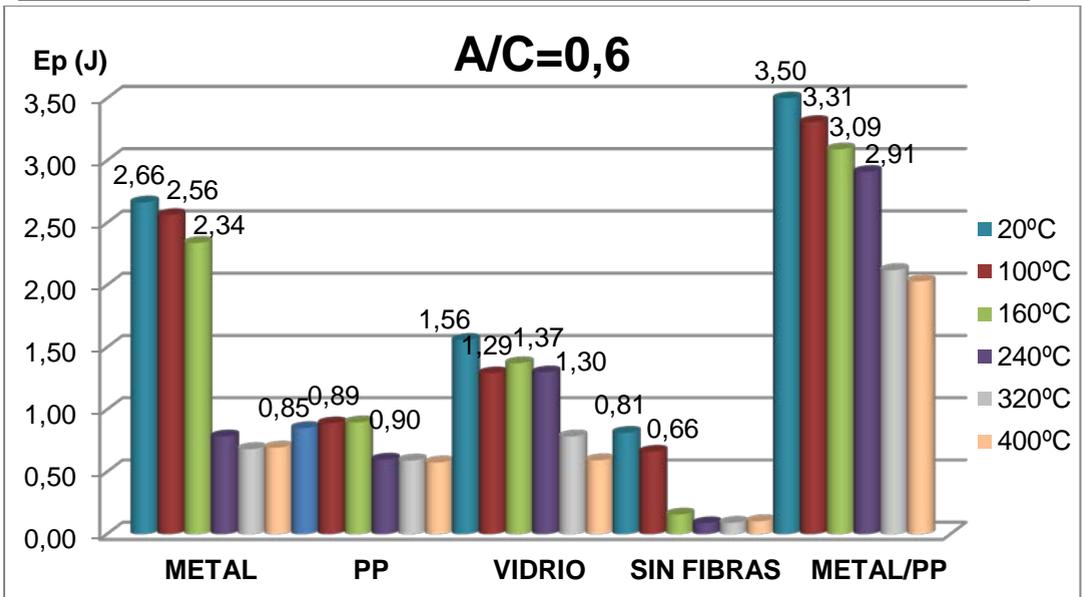


Figura 48 Ep-Tipo fibra para A/C=0,6

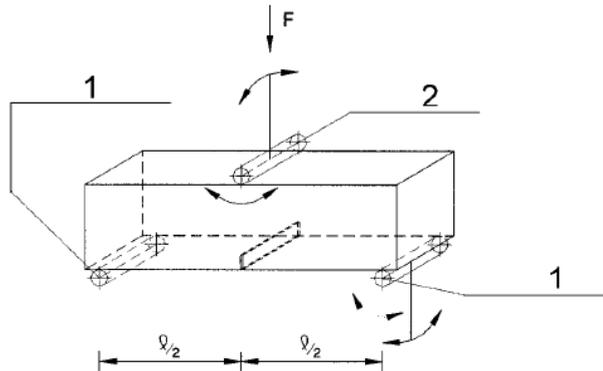
Así pues, puede concluirse que, según este ensayo la mejor combinación es la de 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra metálica junto a 3 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno y una relación de A/C=0,5 ya que el descenso energético no empieza hasta los 240°C, además de que es inferior que para el resto de fibras. Se obtiene una energía máxima de 3,50 J y una mínima de 2,03 J.

## 6.4 Flexión a tres puntos con entalla

El ensayo de flexión a tres puntos con entalla es un ensayo utilizado habitualmente en materiales frágiles, aunque también es aplicable a materiales metálicos. En el presente apartado se pretende obtener la resistencia a tracción por flexión o límite de proporcionalidad (LOP).

Se entiende como LOP la “tensión en el fondo de la entalla que se supone actúa, en el caso de una distribución lineal de tensiones, en una sección no agrietada del centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada  $F_L$ ”.

El comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras metálicas se evalúa mediante valores de resistencia residual a la tracción por flexión determinados a partir de la curva carga-desplazamiento del borde de la fisura, llamándose esto último CMOD, obtenida aplicando una carga puntual centrada sobre un prisma con entalla simplemente apoyado.



**Figura 49 Configuración de la carga sobre la probeta según UNE-EN 14651:2001+A1**

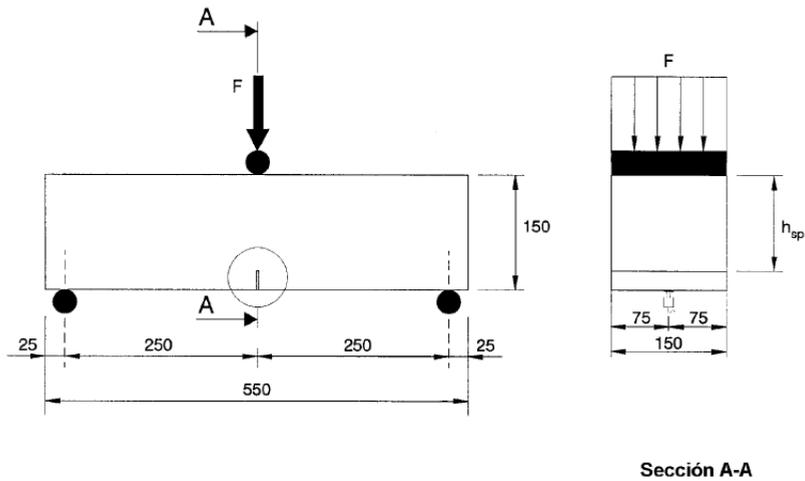
donde

1: rodillo de apoyo.

2: rodillo de carga.

La longitud del vano o distancia entre los centros de los rodillos de apoyo debe ser de 500 mm, con una precisión de  $\pm 2$  mm.

En referencia a las probetas, éstas serán prismáticas (según EN 12390-1) con unas dimensiones de  $150 \times 150 \times (550 \leq L \leq 700)$  mm. En el caso que nos ocupa, se ha escogido una longitud para las probeta de 550 mm. La entalla se practicará mediante aserrado por vía húmeda con una anchura  $\leq 5$  mm. La disposición se muestra en la figura 50.



**Figura 50 Esquema ensayo de flexión a tres puntos con entalla según EN 14651:2005**

En esta situación, la cara inferior de la probeta está sometida a esfuerzos de tracción, mientras que la cara superior está sometida a esfuerzos de compresión, siendo la distribución del momento flector máxima en el centro y nula en los puntos de apoyo.

El LOP se expresa como

$$f_{ct,L}^f = \frac{6M_L}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2}$$

donde

$f_{ct,L}^f$ : es el LOP, en  $N/mm^2$  con una precisión de 0,1  $N/mm^2$ .

$F_L$ : es la carga correspondiente al LOP, en N.

$l$ : es la longitud del vano, en mm.

$b$ : es la anchura de la probeta, en mm.

$h_{sp}$ : es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en mm.

La problemática que presenta el ensayo es que se fuerza el plano de rotura y los resultados son muy sensibles a la cantidad de fibras que atan las fisuras. Por lo que hay dispersiones del orden del 20%, en consecuencia los valores característicos son bajos.

Como ya se ha mencionado, este ensayo se rige por la norma UNE-EN 14651:2007+A1.

## 6.5 Resultados del ensayo de flexión a tres puntos con entalla

En quinto lugar, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo flexión a tres puntos en la tabla siguiente (Tab. 10), donde también se adjuntan los parámetros:

- Número de la probeta.
- Relación agua/cemento (A/C).
- Cantidad de fibras ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- Ciclos de temperatura ( $T^a$ ).
- Carga máxima alcanzada (kN).
- Límite de Proporcionalidad (LOP) (MPa).

**Tabla 10 Resultados ensayo de flexión a tres puntos con entalla**

Probeta	A/C	REFUERZO	$\text{Kg}/\text{m}^3$	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	$C_{\text{max}}$ (kN)	LOP (MPa)
1	0,4	Metal	20	20	180	5,90
2	0,4	Metal	20	100	179	5,82
3	0,4	Metal	20	160	165	4,96
4	0,4	Metal	20	240	32	2,12
5	0,4	Metal	20	320	22	1,91
6	0,4	Metal	20	400	16	1,92
7	0,4	PP	3	20	162	5,80
8	0,4	PP	3	100	162	5,73
9	0,4	PP	3	160	152	5,19



10	0,4	PP	3	240	120	3,01
11	0,4	PP	3	320	8	1,12
12	0,4	PP	3	400	7	1,14
13	0,4	FV	4	20	168	5,70
14	0,4	FV	4	100	161	5,15
15	0,4	FV	4	160	158	5,12
16	0,4	FV	4	240	21	3,10
17	0,4	FV	4	320	12	1,81
18	0,4	FV	4	400	9	1,28
19	0,4	-	0	20	175	5,80
20	0,4	-	0	100	170	5,02
21	0,4	-	0	160	116	4,76
22	0,4	-	0	240	21	1,20
23	0,4	-	0	320	5	0,98
24	0,4	-	0	400	3	0,87
25	0,4	Metal/PP	20/3	20	182	7,20
26	0,4	Metal/PP	20/3	100	179	6,30
27	0,4	Metal/PP	20/3	160	168	6,21
28	0,4	Metal/PP	20/3	240	56	5,58
29	0,4	Metal/PP	20/3	320	35	4,40
30	0,4	Metal/PP	20/3	400	32	4,30
31	0,5	Metal	20	20	164	5,07
32	0,5	Metal	20	100	159	5,18
33	0,5	Metal	20	160	145	4,32
34	0,5	Metal	20	240	28	1,84
35	0,5	Metal	20	320	20	1,66
36	0,5	Metal	20	400	15	1,63
37	0,5	PP	3	20	141	4,93
38	0,5	PP	3	100	138	4,87
39	0,5	PP	3	160	132	4,46
40	0,5	PP	3	240	108	2,62
41	0,5	PP	3	320	7	0,99
42	0,5	PP	3	400	6	0,97
43	0,5	FV	4	20	143	4,85



44	0,5	FV	4	100	138	4,69
45	0,5	FV	4	160	142	4,45
46	0,5	FV	4	240	18	2,64
47	0,5	FV	4	320	11	1,65
48	0,5	FV	4	400	8	1,16
49	0,5	-	0	20	151	5,28
50	0,5	-	0	100	155	4,42
51	0,5	-	0	160	104	4,33
52	0,5	-	0	240	18	1,04
53	0,5	-	0	320	4	0,86
54	0,5	-	0	400	3	0,76
55	0,4	Metal/PP	20/3	20	203	8,20
56	0,4	Metal/PP	20/3	100	201	7,30
57	0,4	Metal/PP	20/3	160	190	7,21
58	0,4	Metal/PP	20/3	240	74	6,58
59	0,4	Metal/PP	20/3	320	57	5,40
60	0,4	Metal/PP	20/3	400	57	5,30
61	0,6	Metal	20	20	140	4,66
62	0,6	Metal	20	100	145	4,31
63	0,6	Metal	20	160	130	3,67
64	0,6	Metal	20	240	26	1,65
65	0,6	Metal	20	320	16	1,49
66	0,6	Metal	20	400	12	1,46
67	0,6	PP	3	20	131	4,52
68	0,6	PP	3	100	126	4,30
69	0,6	PP	3	160	109	4,00
70	0,6	PP	3	240	89	2,14
71	0,6	PP	3	320	6	0,90
72	0,6	PP	3	400	5	0,86
73	0,6	FV	4	20	123	4,28
74	0,6	FV	4	100	122	4,17
75	0,6	FV	4	160	114	4,04
76	0,6	FV	4	240	15	2,51
77	0,6	FV	4	320	9	1,38

78	0,6	FV	4	400	7	0,92
79	0,6	-	0	20	133	4,18
80	0,6	-	0	100	138	3,56
81	0,6	-	0	160	86	3,62
82	0,6	-	0	240	17	0,95
83	0,6	-	0	320	4	0,76
84	0,6	-	0	400	2	0,64
85	0,6	Metal/PP	5/3	20	159	6,20
86	0,6	Metal/PP	5/3	100	160	5,30
87	0,6	Metal/PP	5/3	160	146	5,21
88	0,6	Metal/PP	5/3	240	32	4,58
89	0,6	Metal/PP	5/3	320	14	3,40
90	0,6	Metal/PP	5/3	400	12	3,30

A partir de estos resultados se han elaborado un conjunto de gráficos con el fin de determinar qué relación agua/cemento, cantidad de fibras, etc. es la óptima desde el punto de vista del límite de proporcionalidad (LOP).

Primeramente se ha comparado el LOP, para las diferentes temperaturas, en función de la relación agua/cemento para el mismo tipo de fibra, tal y como se ha hecho en el caso de la carga máxima y de la energía. Así, para el caso de la fibra metálica se observa que el LOP máximo se obtiene para una relación A/C de 0,4. Por otro lado, el descenso notable del LOP, para las tres relaciones A/C, se aprecia entre los 160°C y los 240°C, reduciéndose de 4,96 a 2,12 MPa, aunque de los 240°C a los 400°C no existe casi variación.

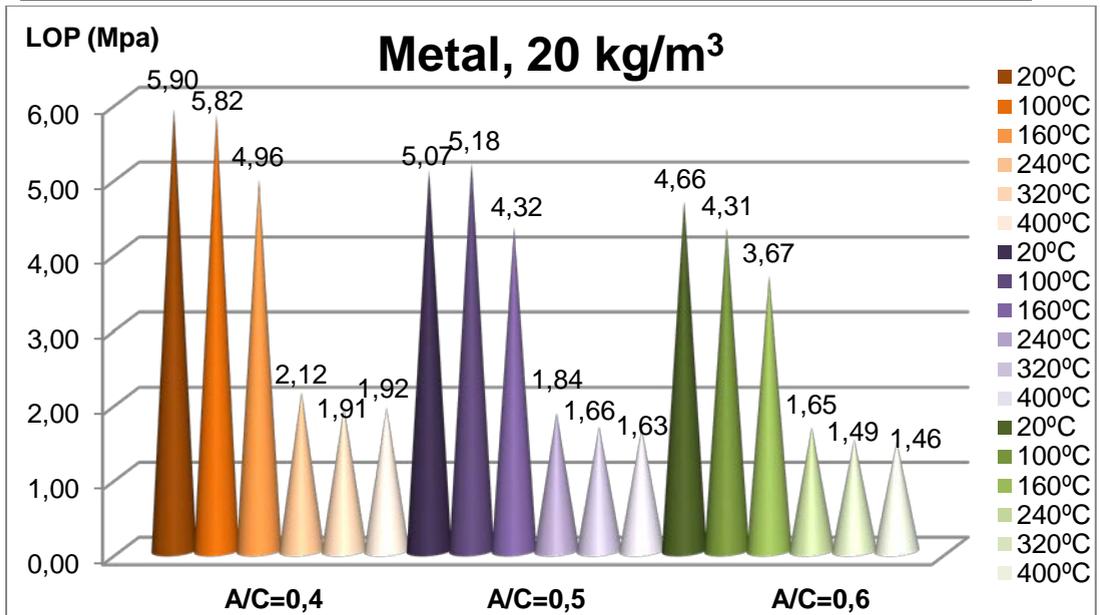


Figura 51 LOP-A/C para fibra metálica

En el caso de la mezcla con fibras de PP también se obtiene el LOP máximo para la relación de A/C=0,4. Respecto al descenso del mismo, éste se aprecia entre los 160°C y los 240°C, reduciéndose de 5,19 a 3,81 MPa. Además, también se aprecia una leve salto del LOP entre los 240°C y los 320°C.

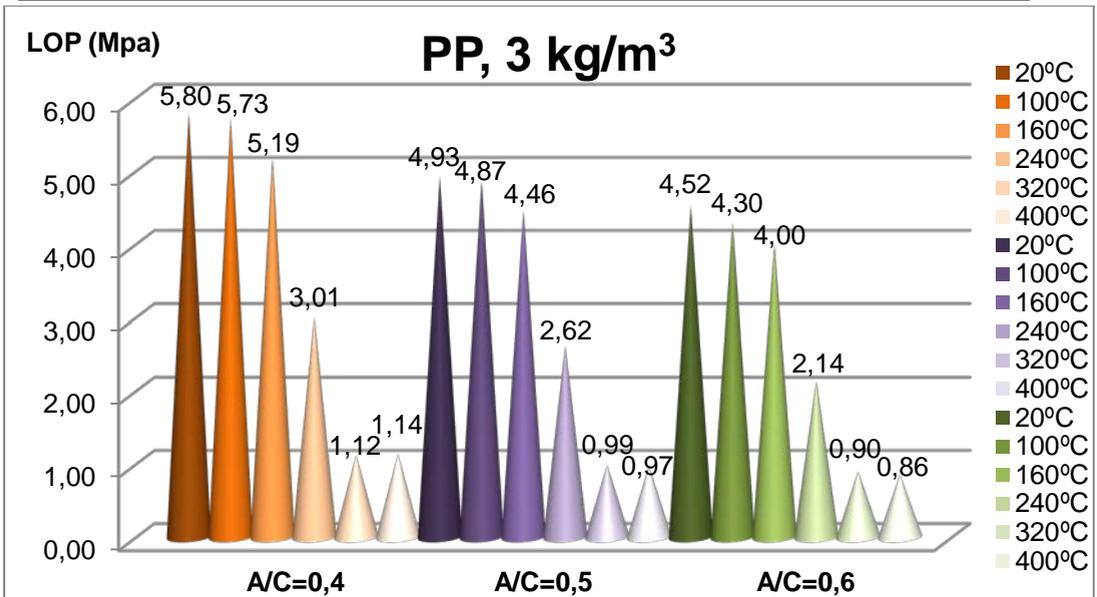


Figura 52 LOP-A/C para fibra de polipropileno

Para la fibra de vidrio también se obtiene el LOP máximo para la relación A/C=0,4, al igual que en la fibra metálica y la de polipropileno, aunque con valores ligeramente inferiores, ya que para fibra metálica el LOP máximo es de 5,90 MPa y para la fibra de vidrio es de 5,70 MPa. El descenso del LOP más destacado se produce entre los 260°C y 240°C, pasando de 5,12 a 3,10 MPa, aunque también hay un pequeño salto entre los 240°C y los 320°C.

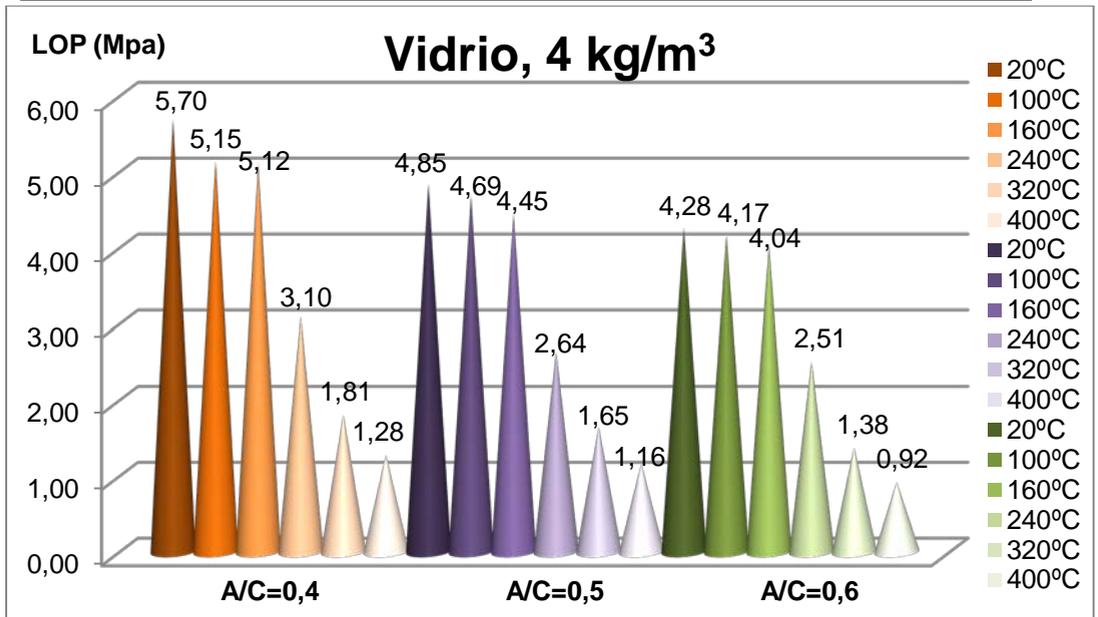


Figura 53 LOP-A/C para fibra de vidrio

En el caso del hormigón sin refuerzo el límite de proporcionalidad máximo se obtiene para la relación A/C=0,4. Por otra parte, en referencia al descenso del mismo, pueden observarse dos puntos de interés. El primer punto se produce entre los 20°C y los 100°C donde hay un ligero descenso de 5,80 a 5,02 MPa. El segundo punto se produce entre los 160°C y los 240°C, donde existe una pérdida significativa de propiedades, reduciéndose de 4,76 a 1,20 MPa.

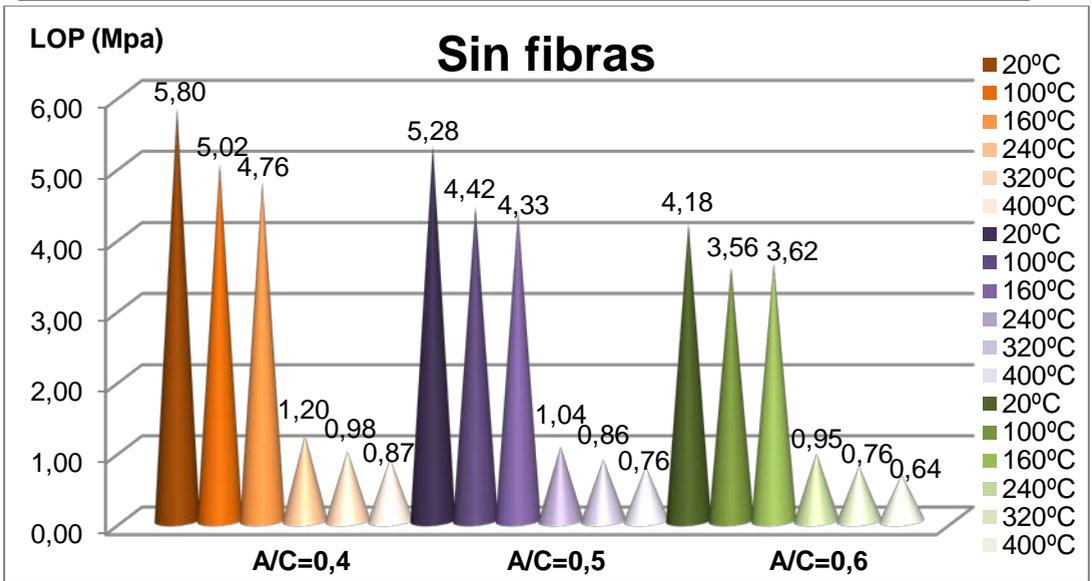


Figura 54 LOP-A/C para hormigón sin refuerzo

Por último, en el caso de la mezcla de fibras metálicas y de PP, se obtiene el LOP máximo para la relación A/C=0,5, con un pico de valor máximo de 8,20 MPa, siendo éste el mayor valor alcanzado de entre todos los tipos de fibra. No obstante, se aprecian pequeños descensos entre los 20°C y los 100°C, y entre los 240°C y los 320°C donde el descenso del límite de proporcionalidad es más acusado, reduciéndose de 6,58 a 5,40 MPa. Por otra parte, los valores mínimos obtenidos son muy superiores a los de las otras fibras. Pues la mezcla de fibras presenta un LOP mínimo de 3,30 MPa, mientras que el máximo del mínimo LOP del resto de fibras asciende a 1,91 MPa en fibra metálica, 1,12 MPa para fibra de polipropileno, 1,28 MPa en fibra de vidrio y 0,87 MPa cuando no hay refuerzo.

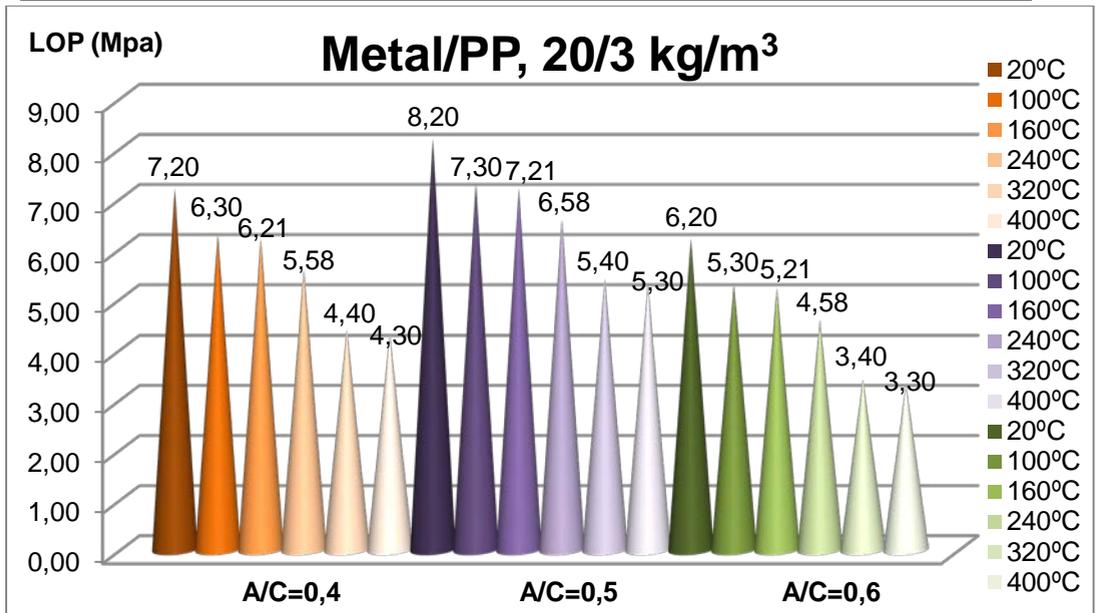


Figura 55 LOP-A/C para fibra metálica/polipropileno

En sexto y último lugar, se ha comparado el LOP, para los diferentes tipos de fibras y temperaturas, manteniendo constante la relación agua/cemento. Como puede observarse en las Figuras 56, Figura 57 y Figura 58, los valores más altos se obtienen en la mezcla de fibras metálicas y de polipropileno para una relación A/C=0,5.

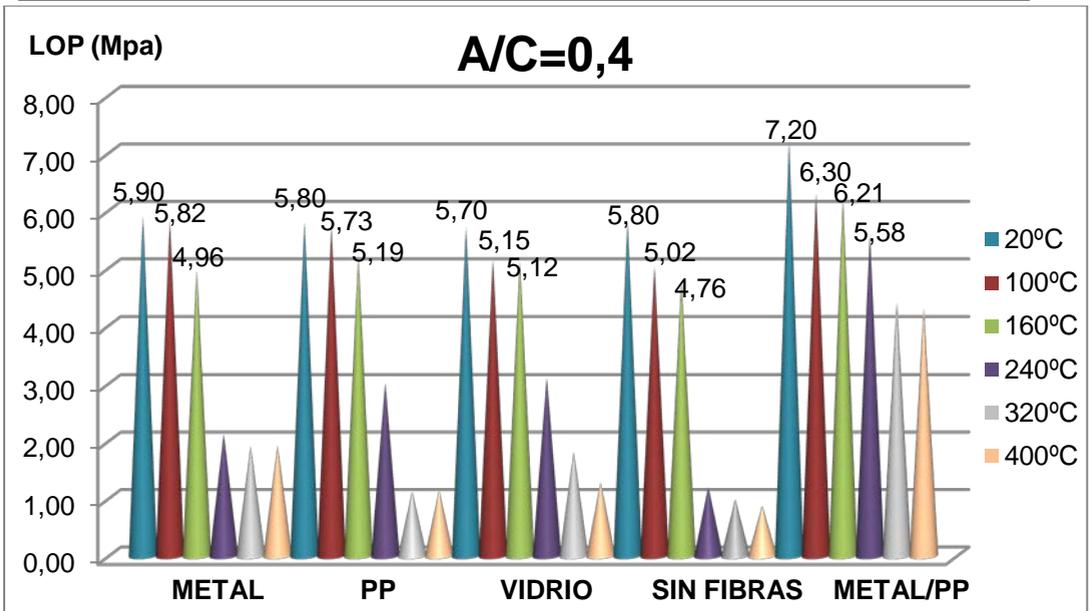


Figura 56 LOP-Tipo fibra para A/C=0,4

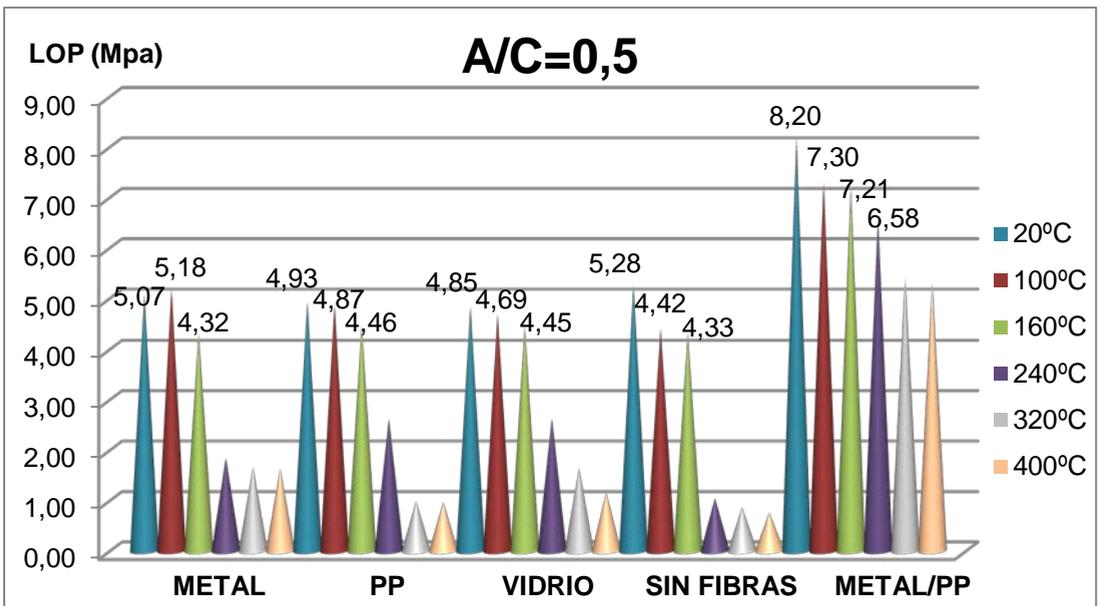


Figura 57 LOP-Tipo fibra para A/C=0,5

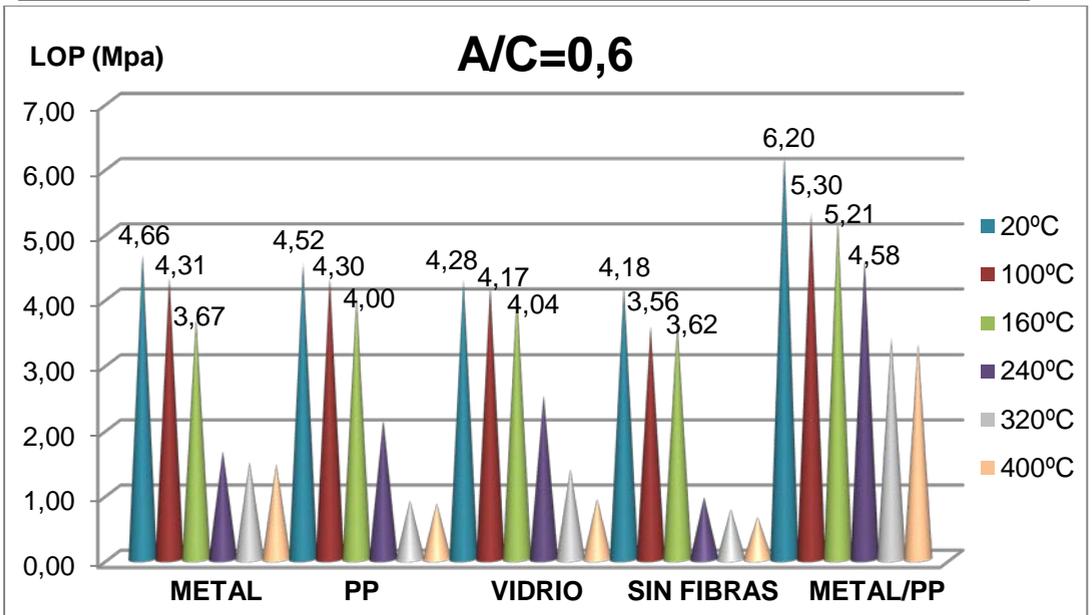


Figura 58 LOP-Tipo fibra para A/C=0,6

Así pues, puede concluirse que, según este ensayo, la mejor combinación es la de 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra metálica junto a 3 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno y una relación de A/C=0,5 ya que el descenso del LOP no empieza hasta los 240°C. Se obtiene un límite de proporcionalidad máximo de 8,20 MPa y uno mínimo de 5,30 MPa, que está alrededor del máximo obtenido con los otros tipos de fibras.

## 6.6 Emisión acústica

La definición de emisión acústica (EA) es “La clase de fenómeno en el cual se generan ondas elásticas mediante la liberación rápida de energía desde fuentes localizadas en un material” [40].

La emisión acústica es un método de inspección no destructivo que ofrece ciertas ventajas frente a métodos convencionales. En el caso de inspeccionar estructuras, no se requiere que éstas estén fuera de servicio

y, además, permite realizar la inspección a nivel global a diferencia de los métodos convencionales cuya evaluación es a nivel local.

Los principales aspectos que diferencian la inspección mediante EA de la inspección mediante métodos convencionales son dos. En primer lugar, la energía que se detecta es liberada desde el interior del material inspeccionado y, en segundo lugar, pueden detectarse procesos dinámicos relacionados con la integridad estructural, tales como crecimientos de grieta y deformación plástica. En la siguiente tabla (Tab. 11) se compara el método de EA frente a los métodos convencionales no destructivos (MND).

Tabla 11 Comparación entre EA y MND [41]

Emisión Acústica	MND
Detecta crecimiento/movimiento del defecto	Detecta la presencia del defecto
En relación a la carga aplicada	En relación a la forma
Sensitivo al material	Menos sensitivo al material
Evaluación a nivel global	Evaluación a nivel local
<b>Problema:</b> ruido y evaluación de datos	<b>Problema:</b> acceso, geometría y evaluación de datos

La detección de señales mediante el uso de emisión acústica se lleva a cabo a partir del uso de transductores colocados en la superficie del material que se quiera inspeccionar. Estos transductores están constituidos por materiales piezoeléctricos, es decir, materiales que no poseen centro de simetría y que, bajo el efecto de una compresión o cizallamiento, disocian los centros de gravedad de las cargas positivas y las negativas generando tensión eléctrica y viceversa. La función del material piezoeléctrico es la de, como se ha descrito, detectar el movimiento de las ondas elásticas (EA) y transformarlo en una señal de voltaje eléctrico. Seguidamente,

este voltaje se amplifica para garantizar la detección de dicho voltaje por parte del equipo de análisis de señal u ordenador [41], [42].

A partir del análisis de las características de las señales obtenidas por EA se puede evaluar el estado de la estructura del material y, en ocasiones, también ubicar los defectos existentes, si los hay.

Los parámetros principales de las señales de emisión acústica son la duración, la amplitud, el tiempo a la máxima amplitud o tiempo de subida, la energía y las cuentas o hits. En la siguiente figura (Fig. 59) se muestran de manera representativa dichos parámetros, así como la forma típica de una señal de EA [41].

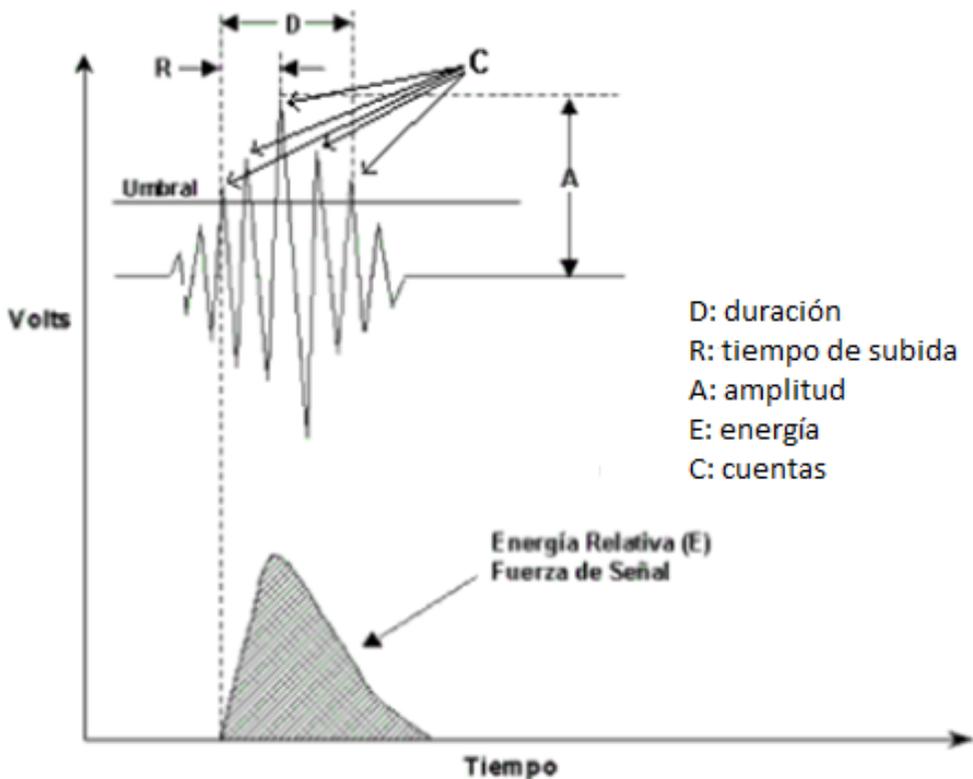


Figura 59 Características de una señal de EA [41]

Cuando se inspecciona una estructura por EA, aparecen movimientos y/o vibraciones ajenas a la misma que producen señales que no son de interés. Este tipo de señales, de cierta amplitud, se designan como ruido. Para evitar su detección, se determina un nivel de detección, denominado umbral, de tal forma que sólo se manifiesten señales con amplitud superior a la amplitud de los ruidos. La definición del resto de parámetros es la siguiente [41]:

- Duración (D). Tiempo que transcurre entre la primera y última señal con amplitud superior a la amplitud umbral. Por otro lado, existen interferencias electromagnéticas y fricción mecánica que emiten señales caracterizadas por duraciones muy cortas y muy largas respectivamente, que permiten su filtrado. No obstante, la duración es un parámetro de gran importancia para mejorar la comprensión de la fuente de generación de las señales. Cuanto más grande sea la grieta, más duración.
- Tiempo de máxima amplitud o Tiempo de subida (Rise Time, R). Tiempo que transcurre entre la primera señal que sobrepasa el umbral y la señal de pico máximo. Al igual que en la duración, las señales generadas por interferencias electromagnéticas se caracterizan por un tiempo R muy corto que permite su filtrado.
- Amplitud (A). Máximo valor alcanzado por la señal, cuyo valor determina la intensidad de la misma. Su valor se expresa en decibelios, dB, y se clasifican según su intensidad en débiles (<35 dB), medias (35 dB a 55 dB), intensas (55 dB a 76 dB) y muy intensas (>75 dB).
- Energía (E). Área encerrada bajo la curva (véase Fig. 59) cuyo valor es proporcional a la energía real de la onda de EA y, al mismo tiempo, es representativo de la duración e intensidad de la señal. Cuanto más grande sea la grieta, más energía.
- Cuentas (C). Número de veces que la señal sobrepasa el umbral. Mide la magnitud de la señal.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el uso de esta técnica podría utilizarse en futuras líneas de investigación como complemento para fundamentar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras.

## 6.7 Resultados del ensayo de Emisión Acústica

La evaluación de la emisión acústica se realizó de manera simultánea a los ensayos de doble punzonamiento. El equipo empleado se denomina Vallen AMSY-5 con un sensor AEP4, operando a una frecuencia de resonancia de 150 kHz (con preamplificador de 34 dB y un Umbral de detección de 40 dB).

La parámetro seleccionado como relevante es el número de ecos (hits) correspondientes al avance o nucleación de microgrietas. Se ha escogido este parámetro en lugar de la amplitud debido a que está relacionado de forma lineal con el daño existente [43], dada la fragilidad y daño de las probetas.

De esta forma, un menor número de impactos en la fase previa al pico de carga representa un menor daño de la microestructura del hormigón, mientras que menores impactos tras el pico representan un mejor comportamiento de las fibras de refuerzo.

En la tabla siguiente (Tab. 12) se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de emisión acústica, así como los parámetros:

- Número de la probeta.
- Relación agua/cemento (A/C).
- Cantidad de fibras ( $\text{kg/m}^3$ ).
- Ciclos de temperatura ( $T^a$ ).
- Hits antepico (ecos antes de  $C_{\max}$ ).
- Hits postpico (ecos después de  $C_{\max}$ ).

Tabla 12 Resultados ensayo emisión acústica

Probeta	A/C	REFUERZO	Kg/m <sup>3</sup>	T (°C)	Emisión acústica	
					Hits antepico	Hits postpico
1	0,4	Metal	20	20	126	942
2	0,4	Metal	20	100	132	941
3	0,4	Metal	20	160	212	1298
4	0,4	Metal	20	240	253	1340
5	0,4	Metal	20	320	265	1381
6	0,4	Metal	20	400	276	1402
7	0,4	PP	3	20	97	846
8	0,4	PP	3	100	98	853
9	0,4	PP	3	160	143	965
10	0,4	PP	3	240	152	984
11	0,4	PP	3	320	139	1002
12	0,4	PP	3	400	148	1006
13	0,4	FV	4	20	92	865
14	0,4	FV	4	100	103	943
15	0,4	FV	4	160	148	1083
16	0,4	FV	4	240	231	1112
17	0,4	FV	4	320	239	1134
18	0,4	FV	4	400	249	1040
19	0,4	-	0	20	104	972
20	0,4	-	0	100	120	1002
21	0,4	-	0	160	154	1096
22	0,4	-	0	240	223	1107
23	0,4	-	0	320	238	1111
24	0,4	-	0	400	246	1121
25	0,4	Metal/PP	20/3	20	114	911
26	0,4	Metal/PP	20/3	100	120	977
27	0,4	Metal/PP	20/3	160	167	1054
28	0,4	Metal/PP	20/3	240	221	1208
29	0,4	Metal/PP	20/3	320	225	1210
30	0,4	Metal/PP	20/3	400	234	1298



31	0,5	Metal	20	20	125	933
32	0,5	Metal	20	100	131	932
33	0,5	Metal	20	160	210	1285
34	0,5	Metal	20	240	250	1327
35	0,5	Metal	20	320	262	1367
36	0,5	Metal	20	400	273	1388
37	0,5	PP	3	20	96	838
38	0,5	PP	3	100	97	844
39	0,5	PP	3	160	142	955
40	0,5	PP	3	240	150	974
41	0,5	PP	3	320	138	992
42	0,5	PP	3	400	147	996
43	0,5	FV	4	20	91	856
44	0,5	FV	4	100	102	934
45	0,5	FV	4	160	147	1072
46	0,5	FV	4	240	229	1101
47	0,5	FV	4	320	237	1123
48	0,5	FV	4	400	247	1030
49	0,5	-	0	20	103	962
50	0,5	-	0	100	119	992
51	0,5	-	0	160	152	1085
52	0,5	-	0	240	221	1096
53	0,5	-	0	320	236	1100
54	0,5	-	0	400	244	1110
55	0,5	Metal/PP	20/3	20	113	902
56	0,5	Metal/PP	20/3	100	119	967
57	0,5	Metal/PP	20/3	160	165	1043
58	0,5	Metal/PP	20/3	240	219	1196
59	0,5	Metal/PP	20/3	320	223	1198
60	0,5	Metal/PP	20/3	400	232	1285
61	0,6	Metal	20	20	137	1027
62	0,6	Metal	20	100	144	1026
63	0,6	Metal	20	160	231	1415
64	0,6	Metal	20	240	276	1461

65	0,6	Metal	20	320	289	1505
66	0,6	Metal	20	400	301	1528
67	0,6	PP	3	20	106	922
68	0,6	PP	3	100	107	930
69	0,6	PP	3	160	156	1052
70	0,6	PP	3	240	166	1073
71	0,6	PP	3	320	151	1092
72	0,6	PP	3	400	161	1097
73	0,6	FV	4	20	100	943
74	0,6	FV	4	100	112	1028
75	0,6	FV	4	160	161	1180
76	0,6	FV	4	240	252	1212
77	0,6	FV	4	320	261	1236
78	0,6	FV	4	400	271	1134
79	0,6	-	0	20	113	1059
80	0,6	-	0	100	131	1092
81	0,6	-	0	160	168	1195
82	0,6	-	0	240	243	1207
83	0,6	-	0	320	259	1211
84	0,6	-	0	400	268	1222
85	0,6	Metal/PP	20/3	20	124	993
86	0,6	Metal/PP	20/3	100	131	1065
87	0,6	Metal/PP	20/3	160	182	1149
88	0,6	Metal/PP	20/3	240	241	1317
89	0,6	Metal/PP	20/3	320	245	1319
90	0,6	Metal/PP	20/3	400	255	1415

A partir de estos resultados se han elaborado un conjunto de gráficos con el fin de determinar qué relación agua/cemento, cantidad de fibras, etc. es la óptima desde el punto de vista de la emisión acústica (EA). Se organizan teniendo en cuenta si los ecos o hits se producen antes o después del pico.

Empezando con los ecos o hits producidos antes del pico, se ha comparado dicho número de hits, para las diferentes temperaturas, en función de la relación agua/cemento para el mismo tipo de fibra, tal y como se ha hecho en casos anteriores. Así, para el caso de la fibra metálica se observa que el número de hits obtenido para las relaciones  $A/C=0,4$  y  $A/C=0,5$  son muy similares. En la relación de  $A/C=0,6$  la cantidad de hits es ligeramente superior. Por otra parte, se observa un salto en el número de hits, para las tres relaciones de  $A/C$ , entre los  $100^{\circ}\text{C}$  y los  $160^{\circ}\text{C}$ , y entre los  $160^{\circ}$  y los  $240^{\circ}\text{C}$ . Así los valores de hits máximos que se obtienen para cada relación  $A/C$  son 276, 273 y 301 hits respectivamente.

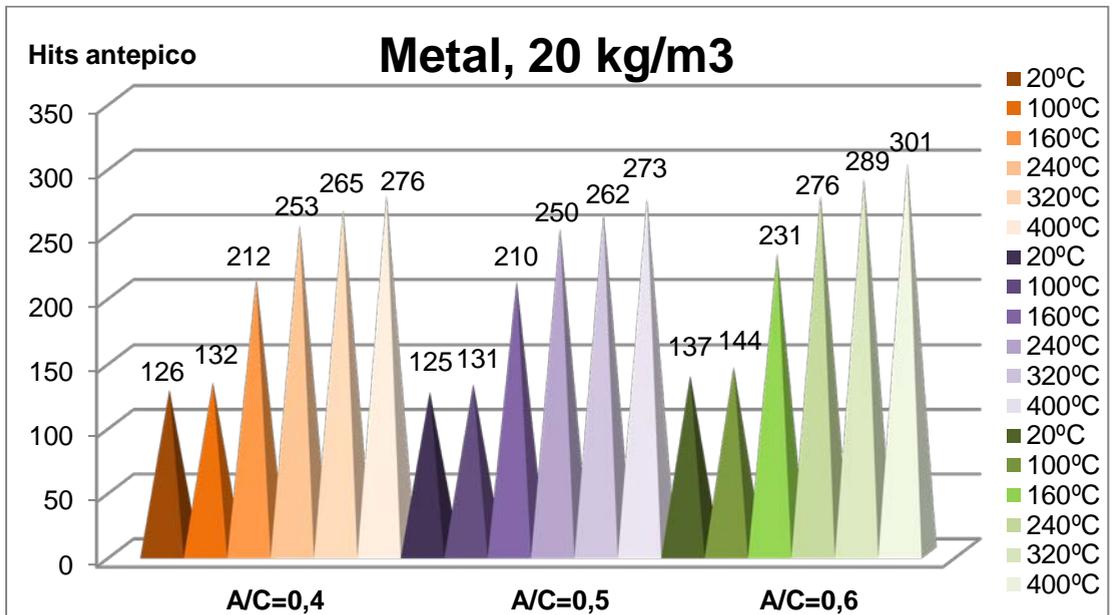


Figura 60 Hits antepico-A/C para fibra metálica

En el caso de las fibras de PP también se obtiene una cantidad de hits similar para las relaciones de  $A/C=0,4$  y  $A/C=0,5$ . Nuevamente, para la relación de  $A/C=0,6$  la cantidad de hits obtenidos es ligeramente superior. Además, en este tipo de fibra se aprecia un aumento en la cantidad de hits entre los  $100^{\circ}\text{C}$  y los  $160^{\circ}\text{C}$ . Asimismo, los hits obtenidos con este tipo de

fibra son notablemente menores que los obtenidos con fibra metálica para todas las relaciones A/C.

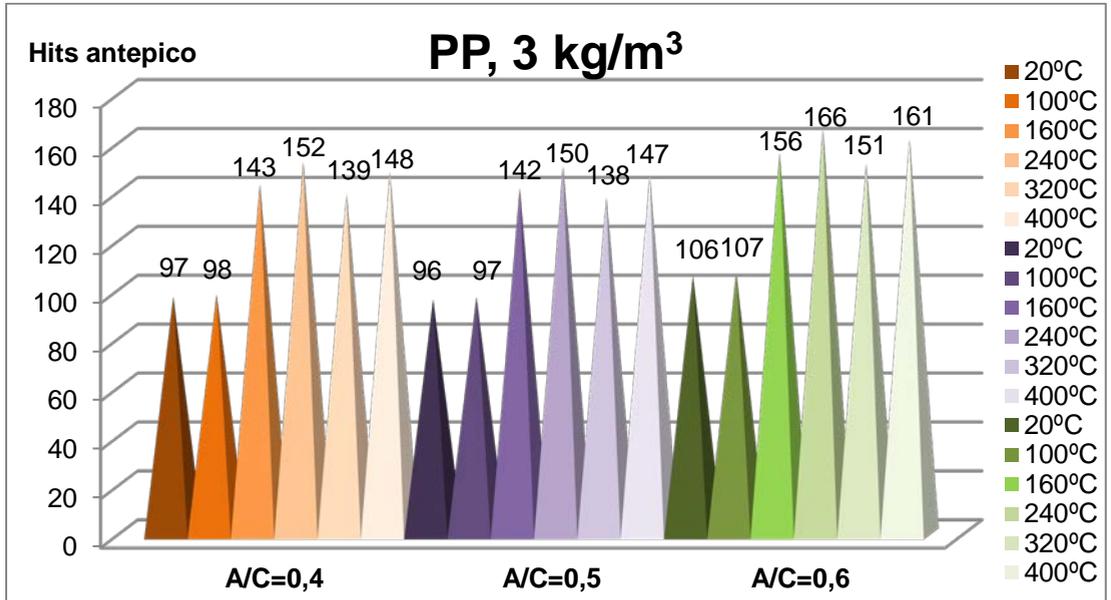


Figura 61 Hits antepico-A/C para fibra de polipropileno

En el caso de la fibra de vidrio también se aprecia que para la relación A/C=0,6 la cantidad de hits obtenidos es un poco superior que para las otras dos relaciones A/C. Por otra parte y a diferencia de los dos tipos de fibras anteriores, en este caso la diferencia más notable entre el número de hits se produce entre los 160°C y los 240°C.

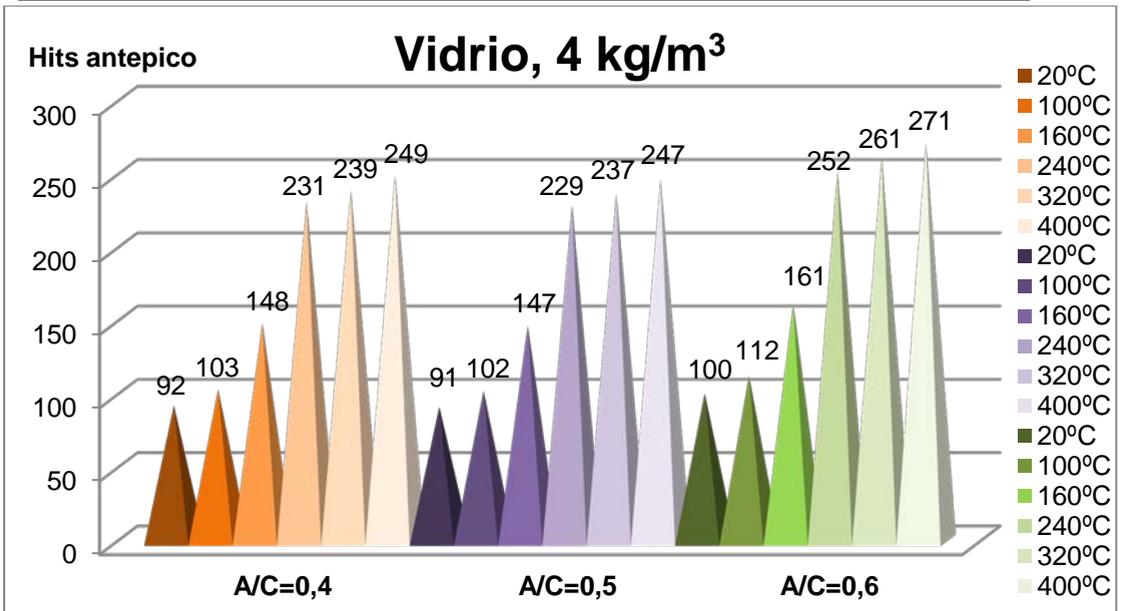


Figura 62 Hits antepico-A/C para fibra de vidrio

En el caso del hormigón sin refuerzo se aprecia que, en comparación con las fibras de vidrio, la cantidad de hits registrada entre los 20°C y los 160°C es superior, pero en cambio entre los 240°C y los 400°C es inferior. Por otra parte, es entre los 160°C y los 240°C donde se produce el salto en la cantidad de hits obtenida. De 148 a 231 hits, respectivamente, en el caso de A/C=0,4.

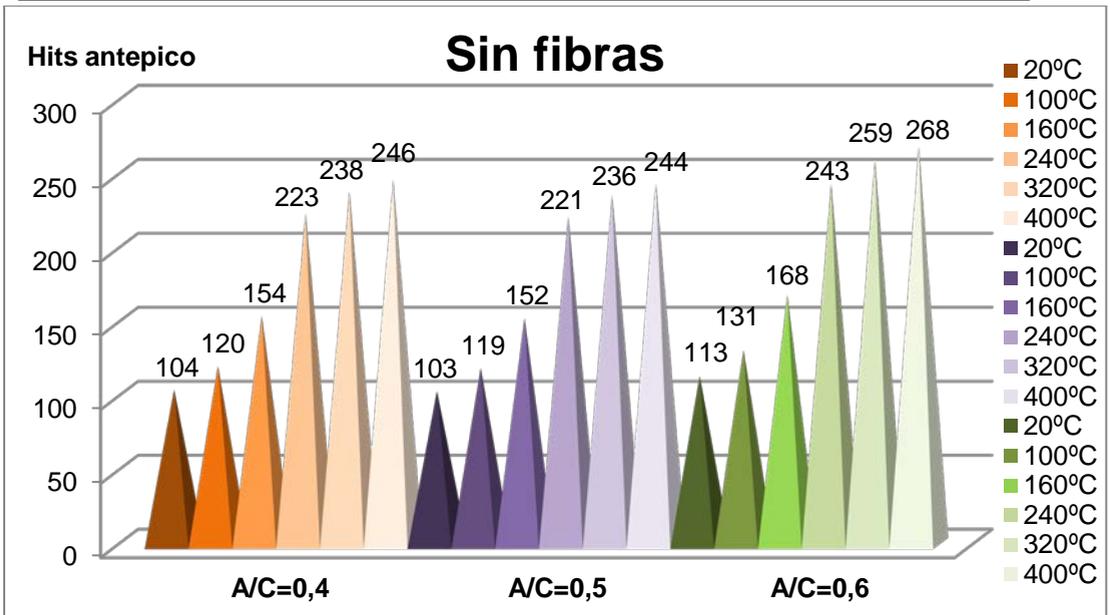
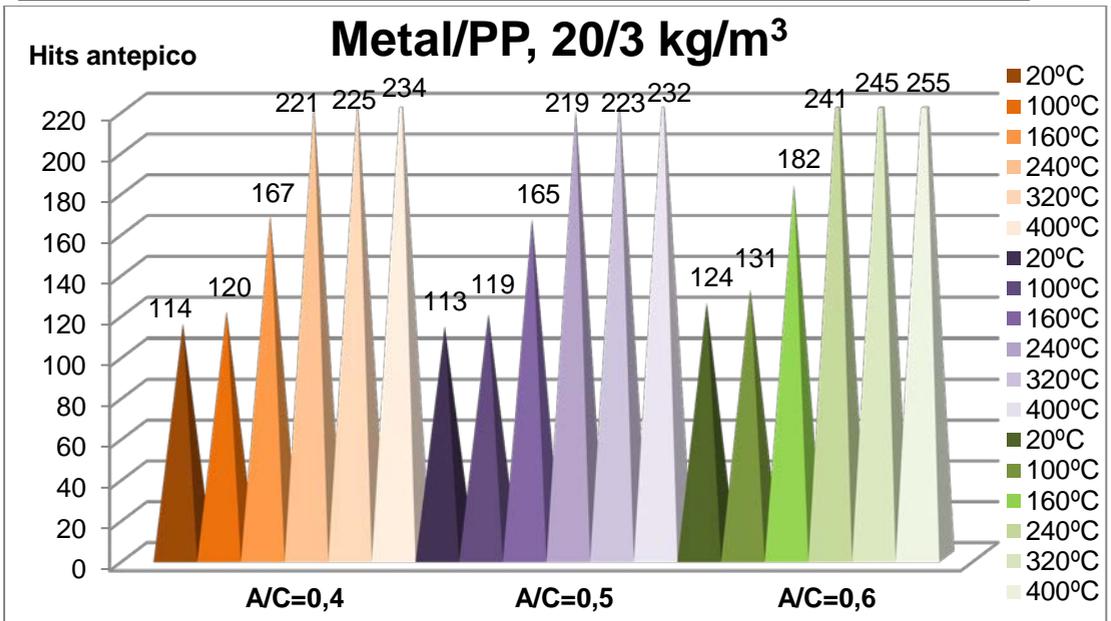


Figura 63 Hits antepico-A/C para hormigón sin refuerzo

Por último, en el caso de la mezcla de fibras metálicas y de PP, se obtienen valores muy similares para  $A/C=0,4$  y  $A/C=0,5$ , y ligeramente superiores para la relación  $A/C=0,6$ . En este caso, también se aprecian dos saltos en referencia a la cantidad de hits registrados. El primero entre los  $100^{\circ}\text{C}$  y los  $160^{\circ}\text{C}$ , y el segundo  $160^{\circ}\text{C}$  y los  $240^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 64 Hits antepico-A/C para fibra metálica/polipropileno**

A continuación se ha comparado el número de hits antepico, para los diferentes tipos de fibras y temperaturas, manteniendo constante la relación A/C. Como puede observarse en las siguientes figuras (Fig.65, Fig.66 y Fig.67), los valores más bajos se obtienen para la relación A/C=0,5 y para la fibra de polipropileno, seguido de la mezcla de la anterior junto con fibra metálica.

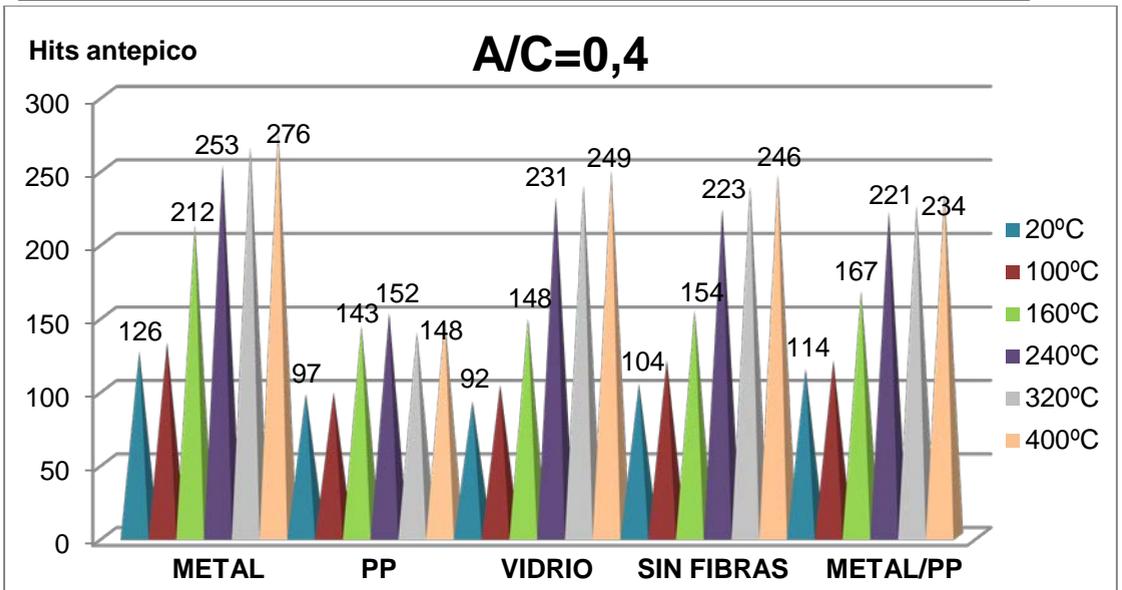


Figura 65 Hits antepico-Tipo de fibra para  $A/C=0,4$

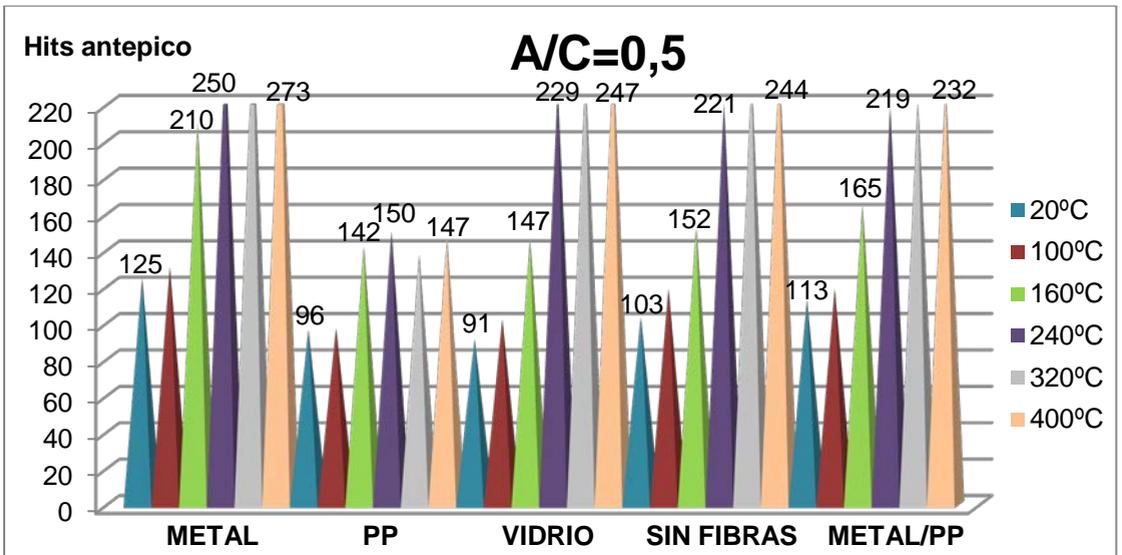


Figura 66 Hits antepico-Tipo de fibra para  $A/C=0,5$

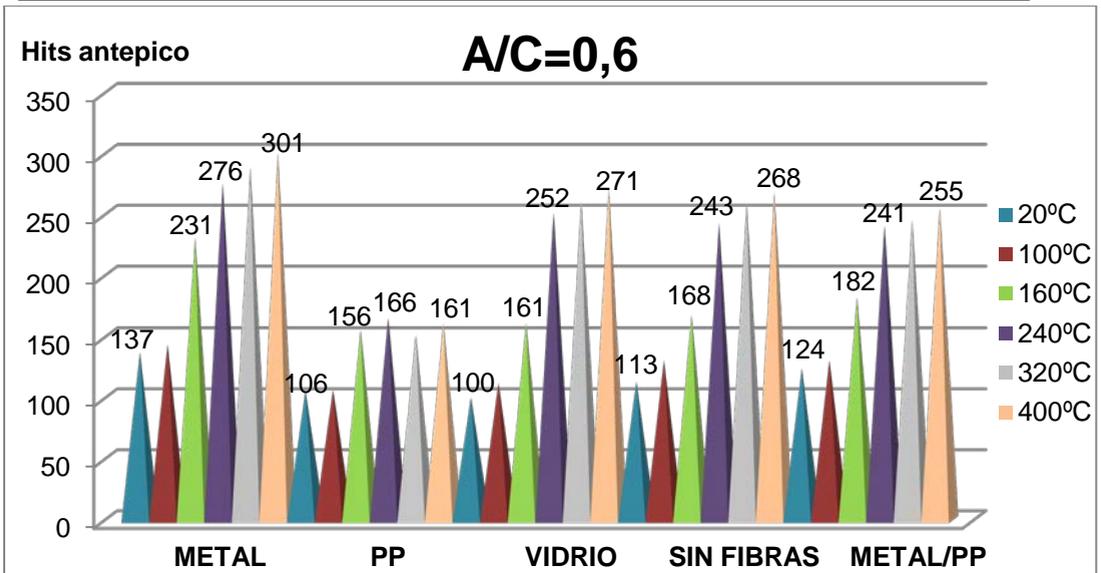


Figura 67 Hits antepico-Tipo de fibra para A/C=0,6

Continuando con los resultados obtenidos a partir de la contabilización de hits después del pico y, procediendo de igual manera que anteriormente, se observa que para el caso de la fibra metálica se observa que el número de hits obtenido para la relación  $A/C=0,4$  es ligeramente superior que la obtenida para la relación  $A/C=0,5$ , y ambas algo inferiores que para la relación de  $A/C=0,6$ . En referencia al salto de hits registrados, éste se encuentra entre las temperaturas de  $100^{\circ}\text{C}$  y  $160^{\circ}\text{C}$ .

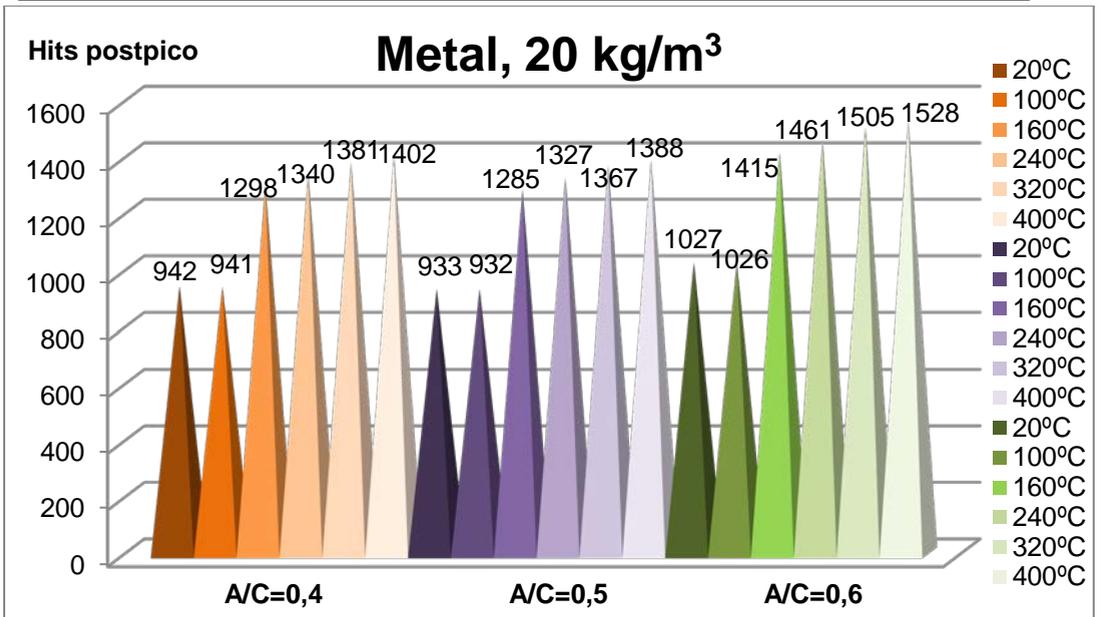


Figura 68 Hits postpico-A/C para fibra metálica

En el caso de las fibras de PP también se obtiene una cantidad de hits ligeramente inferior para la relación de  $A/C=0,5$  respecto la de  $A/C=0,4$ . Nuevamente, para la relación de  $A/C=0,6$  la cantidad de hits obtenidos es superior. Además, en este tipo de fibra se aprecia un pequeño aumento en la cantidad de hits registrados entre los 100°C y los 160°C. Asimismo, los hits obtenidos en este caso son notablemente menores que los obtenidos con fibra metálica a partir de los 160°C.

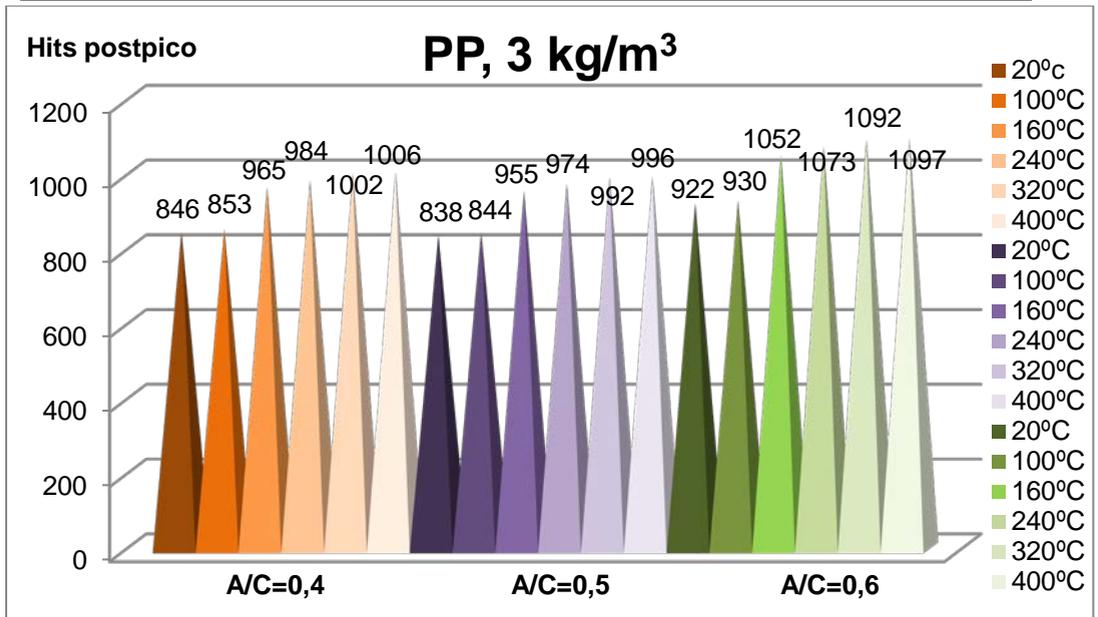


Figura 69 Hits postpico-A/C para fibra de polipropileno

En el caso de la fibra de vidrio también se aprecia que para la relación  $A/C=0,6$  la cantidad de hits obtenidos es un poco superior que para las otras dos relaciones  $A/C$ , siendo éstas últimas similares. En este caso, se observa un suave ascenso en la cantidad de hits registrados entre los 20°C y los 100°C, y entre los 100°C y los 160°C. Por otra parte, entre los 320°C y los 400°C se aprecia un ligero descenso.

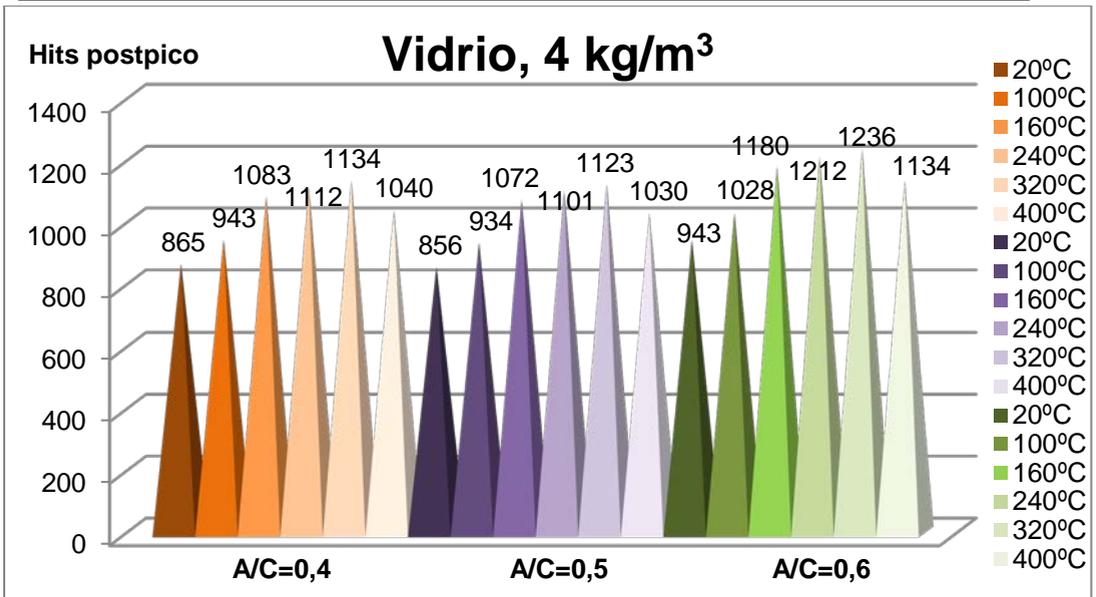


Figura 70 Hits postpico-A/C para fibra de vidrio

En el caso del hormigón sin refuerzo se aprecia que para las relaciones de  $A/C=0,4$  y  $A/C=0,5$  la cantidad de hits registrados es similar e inferior que la registrada para  $A/C=0,6$ . En referencia a los hits en función de la temperatura, existe un ligero ascenso entre los  $20^{\circ}\text{C}$  y los  $160^{\circ}\text{C}$ . Después se mantiene prácticamente constante, registrando una diferencia máxima de 27 hits en  $A/C=0,6$  y de 25 en las otras dos.

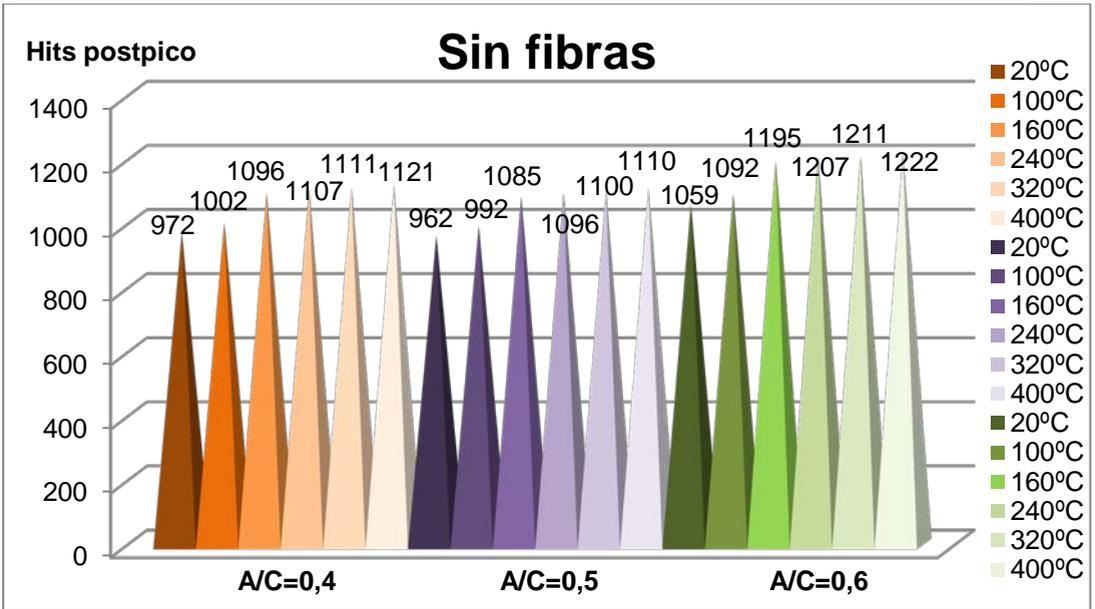
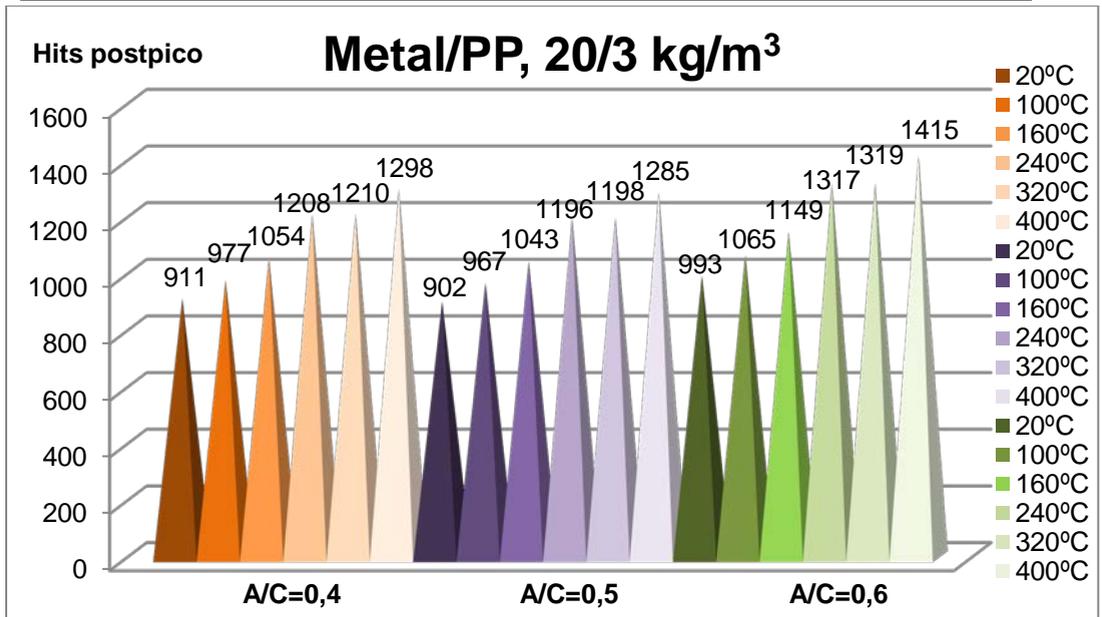


Figura 71 Hits postpico-A/C para hormigón sin refuerzo

Por último, en el caso de la mezcla de fibras metálicas y de PP, se obtienen valores algo superiores para la relación de  $A/C=0,4$  que para la de  $A/C=0,5$ , y superiores a ambas para la relación  $A/C=0,6$ . Además, se aprecia un ascenso escalonado en la cantidad de hits registrados para las tres relaciones agua/cemento.



**Figura 72 Hits postpico-A/C para fibra metálica/polipropileno**

A continuación se ha comparado el número de hits postpico, para los diferentes tipos de fibras y temperaturas, manteniendo constante la relación A/C. Como puede observarse en las siguientes figuras (Fig.73, Fig.74 y Fig.75), los valores más bajos se obtienen para la relación A/C=0,5.

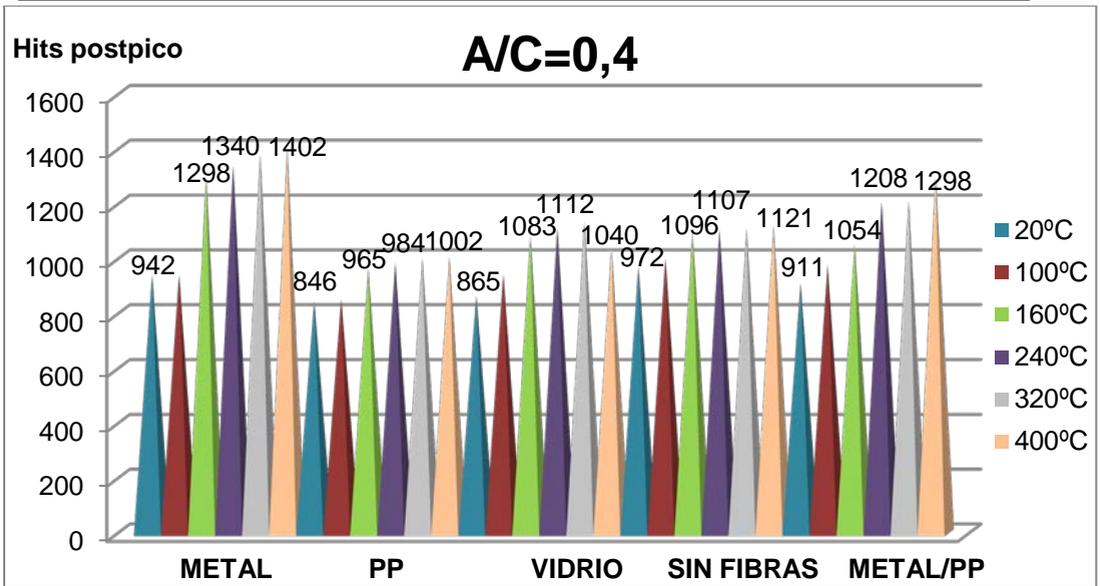


Figura 73 Hits postpico-Tipo de fibra para A/C=0,4

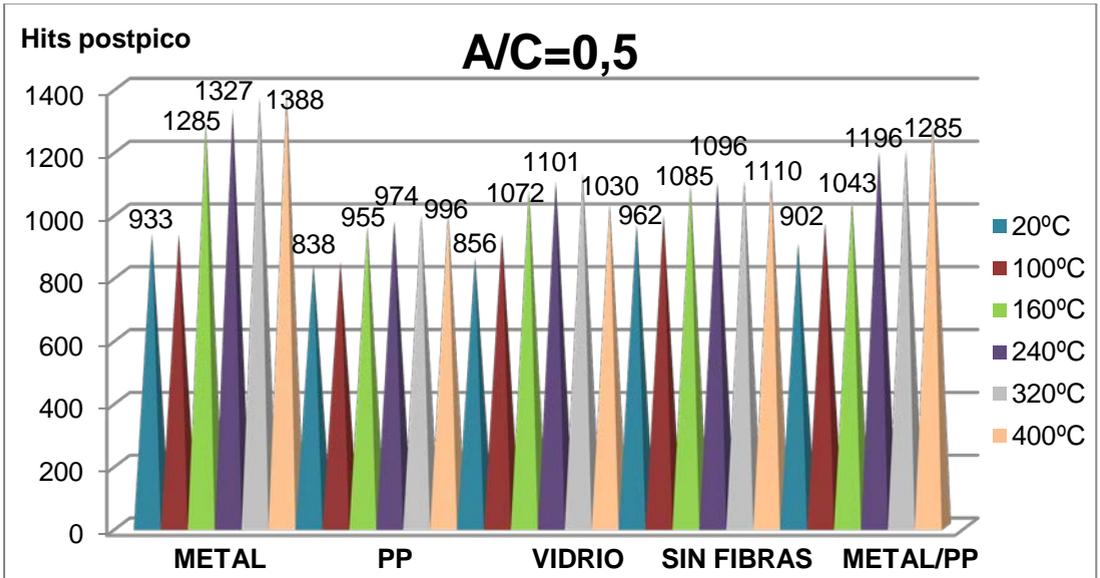


Figura 74 Hits postpico-Tipo de fibra para A/C=0,5

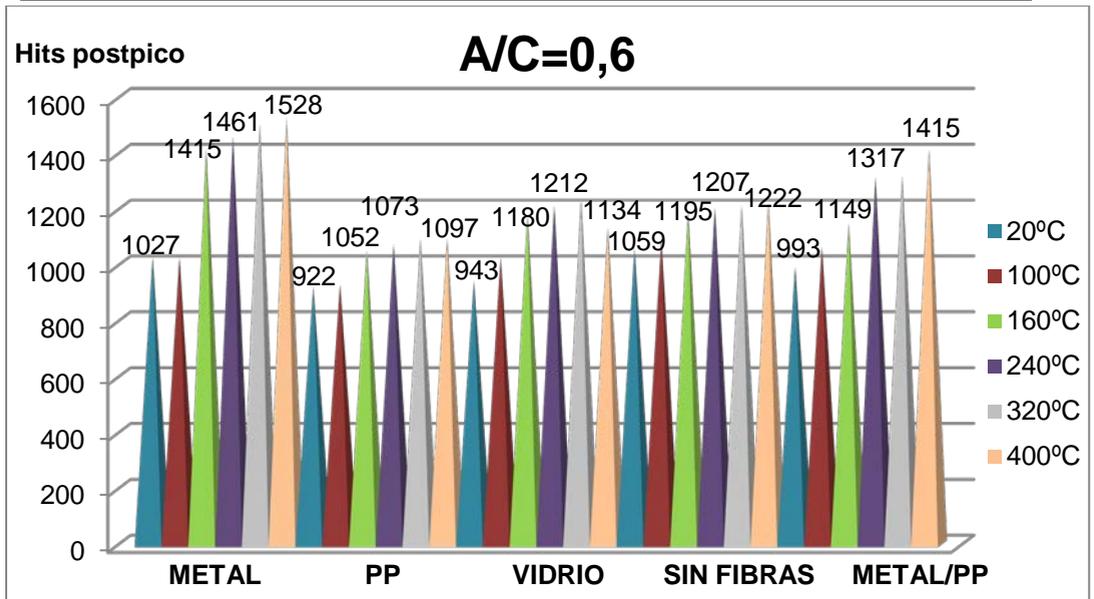


Figura 75 Hits postpico-Tipo de fibra para A/C=0,6

A la vista de estos resultados se comprueba que en ausencia de refuerzo las dosificaciones  $A/C = 0,4$  y  $0,5$  son prácticamente equivalentes, mientras que para  $A/C=0,6$  el daño por el fuego es ligeramente mayor (de manera más marcada después de alcanzar la carga máxima).

Por lo que respecta a las fibras, también es muy destacable el efecto liberador de la nucleación de grietas (menor número de hits registrados) de las fibras que funden como las de PP (más destacado) y las de vidrio (ligeramente mejor que sin refuerzo).

Por otra parte, la introducción de fibras metálicas es perjudicial para la nucleación de grietas (y fragilización) aunque se atenúa en parte si, simultáneamente, se abren canales de ventilación (mezcla de fibras metálicas y de PP). En todo tipo de fibras la formulación idónea es para la relación  $A/C=0,5$  como ya se verificó anteriormente.



## 7 Capítulo: Conclusiones

### 7.1 Introducción

En este capítulo se exponen las conclusiones que se derivan de los distintos estudios desarrollados a lo largo de este trabajo. Estas conclusiones se presentan en forma parcial en primer lugar, para posteriormente evaluarlas en su globalidad.

Las conclusiones específicas corresponden a los distintos aspectos referentes a los estudios que se han realizado con la intención del alcanzar los objetivos propuestos, como es la parte experimental realizada con diversos tipos de fibras, incluyendo ensayos mecánicos y análisis mediante microscopía.

Por su parte, las conclusiones generales corresponden a las conclusiones de la tesis y desarrollo de los objetivos principales que han regido el progreso de esta tesina. Dichos objetivos se han dirigido, por una parte, al

---

desarrollo del conocimiento del comportamiento del hormigón reforzado con fibras, así como un exhaustivo análisis de cómo las fibras colaboran a mejorar la resistencia frente al fenómeno del *spalling* que puede sufrir el hormigón.

## 7.2 Conclusiones específicas

### 7.2.1 Microscopía óptica y electrónica

Como ya se comentó al mostrar las micrografías de microscopía óptica, existe una buena microestructura sin detección de segregaciones en las proximidades de las fibras y con muy escasa porosidad. Por lo que se concluye en todas las muestras ejecutadas (se llevó a cabo microscopía óptica para todas las muestras) que la ejecución del hormigón es correcta.

Por otra parte, la evaluación de las grietas sobre las fibras solo es relevante cuando se habla de fibras metálicas. La nucleación de las grietas se produce debido a los distintos coeficientes de dilatación. Estos efectos se corroboran, tal y como se ha visto anteriormente, mediante la microscopía electrónica de barrido.

En referencia a las grietas y fracturas, éstas permiten demostrar el efecto disgregante del *spalling* (de forma incremental con la temperatura) producido por el agua que pasa a fase vapor. Estos aspectos se asocian a la presencia de partículas de áridos y cemento sueltas en la superficie de la fractura.

El análisis de las fracturas mediante microscopía electrónica de barrido permite detectar microporosidad. Dicha microporosidad procede del gas adsorbido a las fibras de polipropileno y de vidrio y, normalmente, corresponde a una muy ligera gasificación en el fraguado. Esto no se aprecia en microscopía óptica por la preparación.

También se detecta una clara concentración de grietas en las proximidades de las fibras metálicas. Esto se debe a la buena adherencia entre la

superficie de las mismas y el cemento, y también a su variación dimensional con la temperatura. De hecho, la buena adherencia permite que las fibras metálicas atenuen las grietas, disminuyendo así su tasa de progreso y mejorando la resistencia tras alcanzar el valor máximo de la misma.

Además, se observan evidencias de canales en el hormigón para las muestras de temperatura superior a 100°C por fusión de las fibras (polipropileno y vidrio). La micro-red generada por estos canales permite una mayor permeabilidad de la masa.

Por último, no cabe destacar ningún efecto de difusión del metal de refuerzo ni de segregación del hormigón, tal y como se manifiesta con los análisis puntuales de rayos X realizados en microscopía electrónica.

### 7.2.2 Ensayo de doble punzonamiento

En primer lugar decir que se decidió descartar las mediciones de energía a partir del área bajo las curvas de ensayo y del alargamiento. La razón fundamental se debe a que los valores son muy aleatorios. Esta situación se atribuye a la falta de precisión en el sistema de medida del alargamiento en los ensayos (pues no se utilizó extensómetro). Para el caso de la carga máxima, la razón anterior no se considera crítica, ya que en este caso los valores medidos son precisos y permiten obtener conclusiones concluyentes.

Siguiendo con la valoración de la evolución de la carga máxima, se inicia con la variación de la relación agua/cemento (A/C) para, posteriormente, analizar cómo afectan sobre esta base las diferentes fibras de refuerzo.

La relación A/C que maximiza la resistencia en ausencia de cualquier refuerzo es la de  $A/C=0,4$ . No obstante, la pérdida de resistencia al aumentar la relación A/C se mantiene en un orden razonable. Esta situación se mantiene cuando las fibras actúan de forma individual. Sin embargo, al aumentar la carga total de fibras (mezcla de metal y PP) la resistencia es

óptima para  $A/C=0,5$ . Esta evolución se justifica por la mayor fluidez conseguida debido al incremento en la cantidad de agua sin que ésta llegue a ser excesiva como ocurre para la relación  $A/C=0,6$ .

En lo relacionado con el efecto combinado de fibras y fuego (altas temperaturas) es evidente el mayor rendimiento de las fibras metálicas frente a la mayor permeabilidad que ofrecen las fibras fusibles. Sin embargo, se obtienen resultados muy superiores cuando fibras metálicas y fibras de polipropileno actúan de forma combinada.

En consecuencia, mediante el ensayo Barcelona se verifica el efecto positivo que se tiene en la resistencia cuando, junto a una mayor permeabilidad, también se dispone del efecto de atado de grietas que solo pueden aportar las fibras metálicas.

El uso de fibras metálicas y de polipropileno proporciona, para altas temperaturas, una mejora de más del 60% y también evita la explosión del hormigón, lo que es muy relevante en estructuras sometidas a incendios.

### 7.2.3 Ensayo de flexión a tres puntos con entalla

El ensayo de flexión a 3 puntos con entalla ratifica las conclusiones del ensayo Barcelona en todos sus aspectos. La morfología de las fracturas es similar.

Solamente destacar que, en este caso, el efecto de la relación  $A/C$  en la resistencia no es tan notable debido a la mayor dispersión de los valores obtenidos en los ensayos realizados. Esta cuestión corrobora la evidencia cotejada en otras tesis (ver introducción teórica del ensayo en el capítulo 6.4) acerca de la mejor adecuación y representatividad del ensayo Barcelona en hormigones reforzados con fibras, especialmente bajo carga de fuego.

A pesar de estas cuestiones ya conocidas, es muy relevante para la investigación haber verificado que las tendencias y conclusiones obtenidas en el ensayo Barcelona se mantienen en ensayos con mayor concentra-

ción de esfuerzos por entalla (como el del presente apartado). Esta situación valida las conclusiones frente a estructuras reales, donde los efectos de las entallas son impredecibles.

#### 7.2.4 Emisión acústica

A la vista de los resultados obtenidos se determina que, en ausencia de refuerzo, las dosificaciones  $A/C=0,4$  y  $A/C=0,5$  son prácticamente equivalentes, mientras que para  $A/C=0,6$  el dañado por el fuego es ligeramente superior (de manera más marcada después de alcanzar la carga máxima).

Por lo que respecta a las fibras, también cabe destacable el efecto liberador de la nucleación de grietas (menor número de impactos/hits) de las fibras fusibles siendo PP (más destacado) y FV (ligeramente mejor que sin refuerzo).

La introducción de fibras metálicas es perjudicial para la nucleación de grietas (y fragilización) a causa del diferente coeficiente de dilatación, por el posterior efecto de asumir el atado de las grietas y, también debido a que el hormigón carece de resistencia a tracción. Por otra parte, este efecto se atenúa, en parte, si simultáneamente se abren canales de ventilación (mezcla fibra metal y PP). Para todo tipo de fibras la formulación idónea es la relación  $A/C=0,5$  como ya se verificó anteriormente.

### 7.3 Conclusiones generales

El objetivo planteado para la tesis es el estudio de la influencia de las fibras de refuerzo en el hormigón frente al *spalling*. Este objetivo se ha alcanzado plenamente, incluyendo todas las metas específicas planteadas en cuanto a la optimización de parámetros y en fundamentar los modelos de refuerzo que aportan las distintas fibras.

Efectivamente, el fenómeno explosivo del *spalling* para el hormigón en un incendio se puede evitar utilizando una mezcla de fibras de PP y metal consiguiendo así eliminar los riesgos de explosión y mejorar las con-

diciones de seguridad de una estructura sometida a elevadas temperaturas.

Se ha determinado que la relación A/C óptima para el hormigón de referencia es 0,5. También se ha comprobado que la proporción utilizada de fibra metálica (20 Kg/m<sup>3</sup>) y de fibra de PP (3 Kg/m<sup>3</sup>) mezclada y, que por otras tesis se sabe que ofrece una resistencia máxima sin fuego, también es óptima para el caso de incendio.

Por último, se han aportado evidencias que verifican la función de mejora de la permeabilidad (evacuación) del vapor de agua tras superarse los 100°C produce un menor daño del hormigón en su exposición al fuego. Las fibras de metal no tienen este efecto, pero si se ha evidenciado que realizan un atado de las grietas (que se incrementan debido a las diferencias de los coeficientes de dilatación del acero y el hormigón). La combinación de ambos refuerzos ha probado no solo que mantiene los efectos y mecanismos individuales, sino que produce un efecto sinérgico, pues incrementa de forma muy importante (más que la adición de ambos efectos separados) la resistencia.

Las conclusiones de esta tesina serán publicadas en un artículo en la revista JCR “Journal of Materials in Civil Engineering”, así como en una presentación que se ha propuesto para el próximo XIII Congreso de Materiales a celebrar en Barcelona en Junio de 2014.

## 7.4 Futuras líneas de investigación

Los resultados de esta tesina abren una interesante línea de investigación sobre conseguir optimizar los mecanismos de refuerzo verificados (permeabilidad y atado) bajo una hibridación más específica de refuerzos. En efecto, se considera que las fibras de PP industriales utilizadas pueden multiplicar la permeabilidad en caso de incendio con diámetros mucho menores (aligerando la carga pero ampliando la red tras fusión) y polímeros más fusibles. Adicionalmente, las fibras metálicas pueden mejorar su morfología y homogeneización en fabricación



El desarrollo de técnicas experimentales como la emisión acústica permitirá poder analizar otras variables en el ensayo, especialmente si se realiza simultáneamente al ensayo de fuego.

Por último, se considera también una futura línea de investigación el poder realizar ensayos no destructivos de las probetas antes de los ensayos destructivos para evaluar la permeabilidad de la muestra y la distribución de las fibras resistentes.

Todas estas líneas, junto con una modelización numérica que se pueda utilizar como herramienta de diseño, pueden hacer evolucionar esta tesina hacia una tesis doctoral.

## 7.5 Valoración personal

Al evaluar el trabajo llevado a cabo durante el período de realización de esta tesina, puedo decir que el esfuerzo y tiempo dedicado han permitido obtener unos resultados muy satisfactorios en todos los aspectos.

Primeramente, decir que me ha servido como una oportunidad para aprender nuevos conceptos, para aprender a buscar y seleccionar información, métodos de trabajo, etc. Además, esta tesina me ha ofrecido la oportunidad de conocerme a mí misma a nivel personal y profesional, poniendo a prueba mis conocimientos y mi constancia en el trabajo.

Esta tesina refleja el trabajo de todo un período, en el que ha ido tomando forma poco a poco hasta el día de hoy. Ha sido un camino largo y no siempre fácil, pero del que todas las experiencias han sido muy positivas.



## 8 Capítulo: Bibliografía

- [1] Mindeguia, J.C; Pimienta, P; Noumowé, A; Kanema, M. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature. Experimental and numerical discussion on spalling risk. France, 2009.
- [2] Khaliq, W; Kodur, V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. Michigan State University. USA, 2011.
- [3] Yufang, F; Lianchong, L. Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures. Materials and Structures, Volume 44, Issue 1, pp 361-376. January 2011.

- 
- [4] Dwaikat, M.B; Kodur, V.K.R. Fire induce spalling in high strength concrete beams. Department of CEE, Michigan State University, East Lansing. USA, 2009.
- [5] [url=http://www.asefa.es/index.php/patologias/301-efectos-de-incendios-en-estructuras-de-hormigon-armado.html](http://www.asefa.es/index.php/patologias/301-efectos-de-incendios-en-estructuras-de-hormigon-armado.html)  
|título=Efectos de incendios en estructuras de hormigón armado.
- [6] Patología de la edificación 48: Efectos de incendios en estructuras de hormigón armado.pdf
- [7] [url=http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/fuego/156-100-108.pdf](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/fuego/156-100-108.pdf)  
|título=Comportamiento del hormigón en condiciones de incendio.
- [8] Rodgers Bangi, M; Horiguchi, T. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevates temperatures. Hokkaido University. Japan, 2011.
- [9] EHE Anejo 18. Hormigón con fibras.
- [10] Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Building 118, DK-2800 kgs. Lyngby, Denmark. Limits of spalling of fire-exposed concrete.
- [11] Vargas Bello, P. Efecto Spalling y protección del hormigón mediante combinación de fibras. Universidad Austral de Chile. Chile.
- [12] Liu, X; Ye, G; De Schutter, G; Yuan, Y; Taerwe, L. On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. Tongji University. China, 2007.



- 
- [13] Alexander Khoury, G; Anderberg, Y. Concrete Spalling Review. Sweden, 2000.
- [14] Kalifa, P; Chéné, G; Gallé, C. High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure. France, 2001.
- [15] Leo Suhaendi, S; Horiguchi, T. Effect of short fibres on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition. Hokkaido University. Japan, 2006.
- [16] Heo, Y-S; Sanjayan, J.G; Han, C-G; Han, M-C. Relationship between inter-aggregate spacing and the optimum fibre length for spalling protection of concrete in fire. Australia-Republic of Korea, 2011.
- [17] Larbi, J.A.; Polder, R.B. Effects of polypropylene fibres in concrete: Microstructure after fire testing and chloride migration. Delft, Netherlands, 2007.
- [18] Guàrdia Tomàs, J; Molins Borrell, C. Caracterització del comportament a tracció de formigó d'alta treballabilitat reforçat amb fibres d'acer mitjançant l'assaig Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2008.
- [19] Rogers Bangi, M; Horiguchi, T. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. Hokkaido University. Japan, 2011.

- [20] Mármol Salazar, P.C. Hormigones con fibras de acero. Características mecánicas. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2010.
- [21] [url=www.civ.utoronto.ca/vector/current\\_themes\\_&\\_projects.html](http://www.civ.utoronto.ca/vector/current_themes_&_projects.html) | título=Tensile behaviour of Fibre Reinforced Concrete | autor=University of Toronto.
- [22] Miravete, A. Materiales Compuestos I. Ed. Reverté. Barcelona, 2007.
- [23] ECSS-E-HB-32-20 Part 1ª, Table 3.3-1-Reinforcing fibres: Basic properties. March 2011.
- [24] [url=http://www.panelcogrc.es/images/documentos/Especificaciones%20Tecnicas%20PGRC.pdf](http://www.panelcogrc.es/images/documentos/Especificaciones%20Tecnicas%20PGRC.pdf) | título=Especificaciones técnicas paneles de GRC. | autor=Panelco GRC, S.A.
- [25] Albelda, J. Diseño con materiales compuestos: micromecánica, propiedades elásticas. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2012.
- [26] MyPHor Materiales Especiales, S.L. Fibras de polipropileno MPH Fiber 31. Madrid.
- [27] NV Bekaert, S.A. Dramix®. Belgium, 2012.
- [28] NV Bekaert, S.A. Dramix®, Data Sheet RC-65/35-BN. Belgium, 2012.
- [29] NV Bekaert, S.A. Dramix®, Data Sheet RC-80/60-BN. Belgium.

- 
- [30] Qian, C; Wang, H; Sun, W; Guo, Z; Stroeven, P. Numerical calculations of vapour pressure in concrete exposed to fire. China, 2005.
- [31] Markovic, I. High-Performance Hybrid-Fibre Concrete. Serbia, 2006.
- [32] Van der Heijden, G.H.A; Pel, L; Adan, O.C.G. Fire spalling of concrete, as studied by NMR. Eindhoven University of Technology. Netherlands, 2011.
- [33] Ozawa, M; Uchida, S; Kamada, T; Morimoto, H. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission. Japan, 2012.
- [34] Huang, Z. Modelling the bond between concrete and reinforcing Steel in fire. University of Sheffield. UK, 2010.
- [35] [url=http://www.cemex.es/ce/ce\\_pr\\_tc\\_cg6.html](http://www.cemex.es/ce/ce_pr_tc_cg6.html)  
|título=Características del Cemento CEM II/A-V 42,5 R  
|autor=CEMEX.
- [36] Valcuende Payá, M. Construcción 3. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2011
- [37] Lario Femenia, J; Naudín López, A. Hormigón reforzado con fibras. Caracterización de materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2012.
- [38] Saludes Requena, S. Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (ensayo Barcelona). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2006.
- [39] Monsó Varona, A. Análisis del comportamiento del hormigón reforzado con fibras para el ensayo Barcelona y de flexo-



- tracción. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2011.
- [40] American Society of Testing and Materials. Standard terminology for non-destructive examination. E1316-99a.
- [41] Lara Magallanes, J; Martín Sánchez, M. Emisión acústica: método de inspección no destructivo para la evaluación de componentes soldados.
- [42] Orozco Messana, J. Caracterización de materiales: Emisión Acústica. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2012.
- [43] Grosse, C.; Richter, R.; Ozbolt, J.; Acoustic emission analysis used to investigate the spalling effect of concrete under fire load. EWGAE 2010, Vienna NDT.net pp.1-6.