2018

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO DEL
HORMIGÓN EN MASA CON ADICIÓN DE NANOFIBRAS DE
CARBONO (CNFs) Y SU COMPARACIÓN CON
HORMIGONES SIN ADICIÓN Y CON OTRAS ADICIONES**

Rubén Serrano Somolinos
Máster en “Innovación Tecnológica en Edificación”

Directores de tesis

Dr. D. Alfonso Cobo Escamilla
Dr. Ingeniero industrial

Dra. Dña. María Isabel Prieto Barrio
Dra. por la Universidad Politécnica de Madrid

2018

Tribunal nombrado por el Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2018.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2018 en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la UPM:

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento hacia mis directores de Tesis, D. Alfonso Cobo Escamilla y Dña. María Isabel Prieto Barrio, no sólo por haberme ofrecido la oportunidad de desarrollar esta investigación, sino también por su dedicación, confianza y por el apoyo recibido en todo momento. De un modo especial, agradezco a la Dra. María Isabel Prieto Barrio su valiosa ayuda y ánimo, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la tesis.

A la Escuela Técnica Superior de Edificación, por ser mi segunda casa, donde he crecido académica y personalmente a lo largo de todos estos años.

Quiero plasmar en estas líneas un agradecimiento muy especial por la comprensión, paciencia y apoyo recibidos de mi familia, amigos y los que estáis más cerca.

También me gustaría agradecer la ayuda recibida al Laboratorio de Materiales de Construcción, y muy especialmente al Técnico del laboratorio Santiago Villa, por su inestimable ayuda y su buen hacer.

Por último, agradecer al Cuerpo de Bomberos de la Comunidad de Madrid la ayuda recibida por las instalaciones prestadas.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

*“Si buscas resultados distintos, no hagas
siempre lo mismo”*

Albert Einstein

RESUMEN

En la actualidad la nanotecnología apunta a ser la herramienta que a corto plazo generará los nuevos adelantos en ingeniería y por ende será el principal motor del desarrollo de la sociedad. Los nanomateriales están ofreciendo importantes mejoras en el desarrollo de la tecnología, por ello, conocer su interacción con el hormigón frente a la acción de un incendio resulta de un importante atractivo. Conocidas las negativas consecuencias que se derivan en los incendios de los edificios, es importante mejorar los materiales que componen el hormigón y así optimizar su comportamiento frente a la agresión térmica, dando lugar a hormigones innovadores con características extremadamente superiores.

Desde hace mucho tiempo, la incorporación de fibras en el hormigón ha sido una práctica llevada a cabo para mejorar el comportamiento del hormigón. En los últimos años, se han desarrollado mejoras y alcanzado resultados exitosos del comportamiento frente al fuego en el hormigón con la adición de fibras. Sin embargo, la aplicación de la nanotecnología en el hormigón frente a la acción de un fuego real no está experimentado. Por ello, y partiendo de estas premisas, en el presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo el estudio del comportamiento frente al fuego del hormigón en masa con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y su comparación con hormigones sin adición, con adiciones de fibras de polipropileno y de acero, e hibridación de CNFs con fibras polipropileno y de acero. Para ello, se han elaborado probetas de hormigón con las diferentes adiciones y porcentajes de adición, y se han sometido a los ensayos de exposición a fuego real, de resistencia a compresión, de conductividad térmica y del análisis microscópico.

A partir del análisis de resultados, se puede concluir, que la adición de CNFs en el hormigón tradicional revierte en una mejora del efecto “spalling” y del comportamiento mecánico del hormigón frente al fuego, con un aumento de la ductilidad. Permite realizar diseños de hormigones con conductividades térmicas concretas en función de las necesidades existentes. Por otro lado, hay que destacar que los hormigones con adición hibridada de CNFs y fibras, presentan mayores resistencias y una mejor ductilidad después de una

exposición al fuego, dando lugar a un mejor comportamiento mecánico del hormigón. De la misma manera sucede en hormigones con adición de fibras de polipropileno y fibras de acero, donde los resultados a cerca de las características mecánicas son altamente satisfactorios, convirtiéndose en una optimización del hormigón.

Por tanto, el empleo de adición de nanofibras de carbono (CNFs) en el proceso de fabricación del hormigón, así como del uso de fibras e hibridación entre ellas, se convierte en una práctica que presenta ventajas competitivas respecto a las técnicas de construcción convencionales, siendo una buena alternativa al hormigón tradicional.

ABSTRACT

At present, nanotechnology aims to be a tool for the generation of advance in engineering, and it is therefore an important factor for the development of society. Nanomaterials are contributing substantially to the making of new technologies, for that reason, to know their interaction with concrete and its reaction to fire is very important. The negative consequences that result from the effect of fire in buildings impose the need to upgrade the properties of materials in the face of thermal aggression. High performance concrete appears to be the best choice.

For a long time, the incorporation of fibers in concrete has often been used to improve the behavior of this material. In recent years, improvements have been made and successful results of fire behavior in concrete with the addition of fibers have been obtained.

However, the application of nanotechnology in concrete against the action of actual fire has not been properly tested yet. Based on these premises, in the present research work we have carried out the study of the behavior against fire of mass concrete with addition of carbon nanofibers (CNFs) and its comparison with concrete without addition, with additions of polypropylene and steel fibers, and hybridization of CNFs with polypropylene and steel fibers.

To this purpose, concrete specimens with the different additions and addition percentages have been prepared, and have been subjected to the tests of exposure to fire, compression resistance, thermal conductivity and microscopic analysis.

From the analysis of results, it can be concluded that the addition of CNFs in traditional concrete results in reduction of the "spalling" effect and also in an increase the mechanical behavior of the concrete against fire, with an upgrade in ductility. Additionally, it allows to produce concrete designs with concrete thermal conductivities according to the existing needs. On the other hand, it should be noted that concrete with hybridized addition of CNFs and fibers shows higher resistance and better ductility after an exposure to fire, giving rise to a better mechanical behavior of the concrete. A similar case is found in

concrete with addition of polypropylene fibers and steel fibers, where the results of the mechanical characteristics are highly satisfactory, showing a clear upgrade of the concrete under study.

In short, the addition of carbon nanofibers (CNFs) during the concrete manufacturing process, as well as the use of fibers and hybridization between them, becomes a practice that yields competitive results with respect to conventional construction techniques, being a good alternative to traditional concrete.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.- OBJETIVOS	1
1.1.- Motivación	2
1.2.- Objetivo principal	3
1.3.- Objetivos secundarios	3
 CAPÍTULO 2.- ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTOS	 5
2.1.- Introducción	6
2.2.- La invaluable oportunidad en el campo de los nanomateriales: “el grafeno”	7
2.2.1.- Características del grafeno y procesos de obtención	7
2.2.2.- Evolución histórica del grafeno	10
2.2.3.- Aplicaciones del grafeno y sus derivados	11
2.3.- La influencia del fuego en las estructuras de hormigón armado	15
2.3.1.- El hormigón armado como material estructural	15
2.3.2.- Los efectos del fuego en edificación	17
2.3.3.- Comportamiento del hormigón frente al fuego	23
2.3.3.1.- Evolución de los efectos del fuego en las estructuras de hormigón armado	23
2.3.3.2.- Comportamiento mecánico y térmico del hormigón expuesto al fuego	28
2.4.- Hormigón y grafeno, la interacción entre ellos	36
2.4.1.- Comportamiento mecánico del hormigón con adiciones de carbono	36
2.4.2.- Comportamiento frente al fuego del hormigón con adiciones de carbono	39
2.5.- Las estructuras de hormigón con adición de fibras	40
2.5.1.- Características de las fibras	40
2.5.2.- Evolución histórica de las fibras	43
2.5.3.- Comportamiento del hormigón con fibras	46
2.6.- Las estructuras de hormigón con adición de fibras de acero	49

2.7.- Las estructuras de hormigón con adición de fibras de polipropileno.....	53
2.8.- Hormigón con hibridación de fibras.....	55
2.9.- Hormigón con fibras sometido a altas temperaturas.....	57
CAPÍTULO 3.- TRABAJO EXPERIMENTAL REALIZADO.....	63
3.1.- Introducción.....	64
3.2.- Materiales utilizados y proceso de elaboración.....	65
3.2.1.- Medios empleados.....	65
3.2.2.- Materiales empleados.....	66
3.2.3.- Dosificaciones y nomenclatura de cada amasada.....	68
3.2.4.- Proceso de fabricación del hormigón.....	73
3.2.5.- Proceso de elaboración de las probetas de hormigón fresco.....	76
3.3. Planificación de los ensayos.....	78
3.3.1.- Estructura de los ensayos realizados.....	77
3.3.2.- Ensayo a fuego directo.....	80
3.3.3.- Ensayo de resistencia a compresión.....	84
3.3.4.- Ensayo de conductividad térmica.....	85
3.3.5.- Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	86
CAPÍTULO 4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	90
4.1.- Introducción.....	91
4.2.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs), con adición hibridada de CNFs y acero, con adición hibridada de CNFs y polipropileno, con adición de fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno y sin adición.....	91
4.2.1.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y su hibridación con fibras de polipropileno y con acero.....	91
4.2.2.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de fibras de acero y con adición de fibras de polipropileno.....	95
4.2.3.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón sin adiciones.....	98
4.3.- Diagramas tipo de los ensayos a compresión.....	100

4.4.- Resultados de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con distintas adiciones y porcentajes, después del ensayo a fuego directo.....	102
4.4.1.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs), después del ensayo a fuego.....	102
4.4.2.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero, después del ensayo a fuego.....	104
4.4.3.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego.....	105
4.4.4.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego.....	106
4.4.5.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, después del ensayo a fuego.....	108
4.4.6.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón sin adiciones, después del ensayo a fuego.....	110
4.5.- Resultados de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con distintas adiciones y porcentajes.....	111
4.5.1.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs).....	111
4.5.2.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero.....	113
4.5.3.- Resultados del ensayo de compresión en probetas con adición hibridada de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno.....	114
4.5.4.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de acero.....	116
4.5.5.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno.....	118
4.5.6.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón sin adiciones.....	120
4.6.- Resultados del ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con distintas adiciones y porcentajes.....	121

4.6.1.- Resultados del ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y su hibridación con otras fibras.....	121
4.6.2.- Resultados del ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, polipropileno y sin adición.....	121
4.7.- Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	122
CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	125
5.1.- Consideraciones de partida.....	126
5.2.- Análisis del comportamiento en hormigones con adición de CNFs, adición hibridada de CNFs y polipropileno, adición hibridada de CNFs y acero, adición de polipropileno, adición de acero y sin adición, durante el ensayo a fuego.....	126
5.2.1.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición de 1% CNFs en peso de cemento durante el ensayo a fuego.....	127
5.2.2.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición de 2% CNFs en peso de cemento durante el ensayo a fuego.....	128
5.2.3.- Análisis del comportamiento del hormigón sin adición durante el ensayo a fuego.....	129
5.2.4.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo del hormigón con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento, durante el ensayo a fuego.....	130
5.2.5.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1% en peso de cemento, durante el ensayo a fuego.....	131
5.2.6.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en peso de cemento, durante el ensayo a fuego.....	132
5.2.7.- Comparativa de la evolución de la temperatura media respecto al tiempo en hormigones sin adición, con adición de 1% y 2% de CNFs, con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% y con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1%, durante el ensayo a fuego.....	133
5.2.8.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones sin adición, con porcentajes del 1% y 2% de fibras de polipropileno y con porcentajes del 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, durante el ensayo a fuego.....	134

5.3.- Análisis del comportamiento mecánico a compresión del hormigón con adición de CNFs, con hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, con hibridación de CNFs con fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno, con adición de fibras de acero y hormigones sin adición, después de estar sometido al ensayo de fuego.....	138
5.3.1.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigón sin adiciones, antes y después del ensayo a fuego.....	138
5.3.2.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento entre sí, antes y después del ensayo a fuego.....	142
5.3.3.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	145
5.3.4.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	152
5.3.5.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento con hormigones de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	158
5.3.6.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento con hormigones de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	161
5.4.- Análisis del comportamiento de la conductividad térmica en hormigones con adición de CNFs, con adición hibridada de CNFs y polipropileno, con adición hibridada de CNFs y acero, con adición de polipropileno, con adición de acero y hormigones sin adición.....	166
5.4.1.- Análisis estadístico del ensayo de la conductividad térmica en hormigones con adición de CNFs, con adición hibridada de CNFs y polipropileno y con adición hibridada de CNFs y acero.....	169
5.4.2.- Análisis del efecto de las diferentes adiciones en el hormigón sobre la conductividad térmica con humedad relativa 50%.....	170

5.4.3.- Análisis estadístico del ensayo de la conductividad térmica en hormigones con adición de fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno y hormigones sin adición.....	172
5.4.3.1- Estudio del efecto de la adición de fibras de acero en 1% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón.....	173
5.4.3.2- Estudio del efecto de la adición de fibras de acero en 2% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón.....	174
5.4.3.3- Estudio del efecto de la adición de fibras de polipropileno en 1% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón.....	176
5.4.3.4- Estudio del efecto de la adición de fibras de polipropileno en 2% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón.....	177
5.5.- Análisis del comportamiento mecánico a compresión del hormigón con adición de CNFs, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero y hormigones sin adición.....	180
5.5.1.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento entre sí.....	180
5.5.2.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones sin adición.....	182
5.5.3.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento.....	184
5.5.4.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento.....	188
5.5.5.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento.....	192

5.5.6.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento.....	194
5.6.- Caracterización química y microscópica mediante la técnica Scanning Electron Microscopy (SEM) del hormigón con adición de CNFs, con adición de fibras de polipropileno, con adición de fibras de acero y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego.....	198
5.6.1.- Comparativa de la caracterización microscópica entre hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego.....	199
5.6.1.1.- Comparativa de la microscopía electrónica de barrido a 300 aumentos y 20Kv en hormigones con adición de CNFs al 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego.....	201
5.6.1.2.- Comparativa de la microscopía electrónica de barrido a 2000 aumentos y 20Kv en hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego.....	204
5.6.1.3.- Comparativa de la microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos y 20Kv en hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego.....	204
5.6.2.- Microanálisis por energía dispersa de rayos X en lámina delgada a 100 aumentos en hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	206
5.6.2.1.- Microanálisis por energía dispersa de rayos X en lámina delgada a 500 aumentos en hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	208
5.6.3.- Comparativa de la caracterización microscópica de hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego.....	210
5.6.4.- Comparativa de la caracterización microscópica de hormigones con adición de 1% y 2% de fibras con acero, antes y después del ensayo a fuego.....	211

6.- CONCLUSIONES.....	213
6.1.- Conclusiones del comportamiento durante el ensayo a fuego en hormigones con adición y sin adición.....	214
6.2.- Conclusiones del comportamiento mecánico a compresión en hormigones con adición y sin adición, después del ensayo de fuego.....	215
6.3.- Conclusiones del comportamiento de la conductividad térmica en hormigones con adición y sin adición.....	217
6.4.- Conclusiones del comportamiento mecánico a compresión en hormigones con adición y sin adición.....	217
6.5.- Conclusiones de la caracterización química y microscópica mediante la técnica SEM, entre hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% y hormigones sin adición antes y después del ensayo a fuego.....	219
6.6.- Conclusiones definitivas.....	220
 7.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	 222
 BIBLIOGRAFÍA.....	 224

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Representación de la lámina de grafeno y sus derivados.....	7
Figura 2.2.- Estructura molecular del grafeno.....	2
Figura 2.3.- Aplicaciones del grafeno.....	13
Figura 2.4.- Aplicaciones informáticas del grafeno.....	13
Figura 2.5.- Incendio en edificación.....	17
Figura 2.6.- Fases de un fuego natural, comparando temperaturas atmosféricas con la curva estándar de fuego ISO 834.....	18
Figura 2.7.- Temperaturas de la curva normalizada tiempo-temperatura ISO-834.....	20
Figura 2.8.- Gráfico de isothermas.....	24
Figura 2.9.- Método de la Isotherma 500.....	25
Figura 2.10.- Incendio en edificios con estructura de hormigón.....	25
Figura 2.11.- Variación de resistencia y de coloración del hormigón con temperaturas elevadas.....	28
Figura 2.12.- Migración del vapor de agua a través de los capilares por aumento de la temperatura, produciéndose el fenómeno “spalling”.....	34
Figura 2.13.- Elementos de hormigón con adición de fibras.....	42
Figura 2.14.- Palacio de los Deportes de Roma.....	44
Figura 2.15.- Aspecto superficial y microscópico de hormigón con fibra de polipropileno.....	55
Figura 3.1.- a) Nanofibras de carbono; b) fibras metálicas; c) Fibras de polipropileno...	67
Figura 3.2.- Probetas sin adición y con sus distintos porcentajes de adición.....	70
Figura 3.3.- Probetas cúbicas sin adiciones y con sus distintos porcentajes de adición.....	72
Figura 3.4.- Proceso de tamizado de la grava.....	73
Figura 3.5.- Básculas para pesar los diferentes materiales empleados en la fabricación de las probetas.....	73
Figura 3.6.- Proceso de amasado manual y mecánico en probetas con y sin adiciones.....	74
Figura 3.7.- Proceso de elaboración de las probetas cilíndricas y cúbicas.....	75
Figura 3.8.- Proceso experimental de elaboración de probetas con y sin adiciones.....	76

Figura 3.9.- Proceso experimental correspondiente al curado de las probetas en cámara húmeda.....	77
Figura 3.10.- Fases de desarrollo de un incendio.....	80
Figura 3.11.- Bandeja y parrilla de ensayos a fuego real.....	81
Figura 3.12.- Proceso experimental durante el ensayo a fuego.....	82
Figura 3.13.- Proceso experimental de refrentado de las probetas.....	83
Figura 3.14.- Ensayo experimental de rotura a compresión.....	84
Figura 3.15.- Equipo “Decagon” y sonda TR-1, preparada para el ensayo de conductividad térmica.....	85
Figura 3.16.- Microscopio electrónico de barrido.....	86
Figura 3.17.- Preparación de muestras mediante corte fresco.....	87
Figura 3.18.- Preparación de muestras con lámina delgada.....	87
Figura 4.1.- Gráfica temperatura/tiempo en probetas de hormigón con adición de fibras de acero 1%-2% durante 1 hora de ensayo a fuego.....	95
Figura 4.2.- Gráfica tiempo/temperatura en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno 1%-2% durante 1 hora de ensayo a fuego.....	96
Figura 4.3.- Gráfica temperatura/tiempo en probetas de hormigón sin adición durante 1 hora de ensayo a fuego.....	98
Figura 4.4.- Gráfica modelo de fuerza “F” (kN)/ carrera “ δ ” (mm) del hormigón ensayado a compresión.....	99
Figura 4.5.- Modelo de gráfica tensión “ σ_c ” (N/mm ²)/ deformación “ ϵ_c ” del hormigón ensayado a compresión.....	100
Figura 4.6.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento, después del ensayo a fuego.....	102
Figura 4.7.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento, después del ensayo a fuego.....	102
Figura 4.8.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero, después del ensayo a fuego.....	103
Figura 4.9.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego.....	104
Figura 4.10.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de polipropileno en peso del cemento, después del ensayo a fuego.....	106

Figura 4.11.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de fibras de polipropileno en peso del cemento, después del ensayo a fuego.....	106
Figura 4.12.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de acero en peso del cemento, después del ensayo a fuego.....	108
Figura 4.13.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 2% de fibras de acero en peso del cemento, después del ensayo a fuego.....	108
Figura 4.14.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón sin adiciones, después del ensayo a fuego.....	109
Figura 4.15.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento.....	111
Figura 4.16.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento.....	111
Figura 4.17.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero.....	113
Figura 4.18.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno.....	114
Figura 4.19.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de acero en peso de cemento.....	116
Figura 4.20.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de fibras de acero en peso de cemento.....	116
Figura 4.21.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento.....	118
Figura 4.22.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento.....	118
Figura 4.23.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón sin adiciones.....	119
Figura 4.24.- Microscopía electrónica de barrido en probetas de hormigón sin adición (a), con adición de 1% de CNFs (b) y adición de 2% de CNFs (c).....	122
Figura 4.25.- Microscopía electrónica de barrido en probetas sin adición (a), con adición de 1% de CNFs (b) y adición de 2% de CNFs (c), después del ensayo a fuego.....	123
Figura 5.1.- Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición de 1% de CNFs, en la zona alta, media y baja de la probeta.....	127
Figura 5.2.- Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición de 2% de CNFs, en la zona alta, media y baja de la probeta.....	128
Figura 5.3.- Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones sin adición, en la zona alta, media y baja de la probeta.....	129

Figura 5.4.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento, en la zona alta, media y baja de la probeta.....	130
Figura 5.5.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1% en su zona alta, media y baja de la probeta.....	131
Figura 5.6.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en su zona alta, media y baja de la probeta.....	132
Figura 5.7.- Comparativa de la evolución de la temperatura media respecto al tiempo en hormigones sin adición, con adición de 1% y 2% de CNFs, con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% y con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1%.....	134
Figura 5.8.- Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones sin adición, con adición de fibras de polipropileno en 1% y 2% y hormigón con adición de fibras de acero 1% y 2% en peso de cemento.....	136
Figura 5.9.- Aspecto exterior del hormigón inmediatamente después de un incendio real.....	137
Figura 5.10.- Color gris rosáceo del hormigón después de alcanzar una temperatura de 400 °C.....	137
Figura 5.11.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigón sin adiciones.....	139
Figura 5.12.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y un hormigón sin adiciones.....	140
Figura 5.13.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones sin adición, después del ensayo a fuego.....	141
Figura 5.14.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y un hormigón sin adiciones después del ensayo a fuego.....	142
Figura 5.15.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs antes y después del ensayo a fuego.....	143
Figura 5.16.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs antes y después del ensayo a fuego.....	143

Figura 5.17.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% y 2% de CNFs después del ensayo a fuego.....	144
Figura 5.18.- Comportamiento del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de CNFs después del ensayo a fuego hasta alcanzar la fracturación catastrófica.....	145
Figura 5.19.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de polipropileno.....	146
Figura 5.20.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de polipropileno.....	147
Figura 5.21.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego.....	148
Figura 5.22.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego.....	148
Figura 5.23.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de polipropileno.....	149
Figura 5.24.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de polipropileno.....	150
Figura 5.25.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego.....	151
Figura 5.26.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego.....	151
Figura 5.27.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de acero.....	152
Figura 5.28.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de acero.....	153

Figura 5.29.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de acero después del ensayo a fuego.....	154
Figura 5.30.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de acero después del ensayo a fuego.....	154
Figura 5.31.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de acero.....	155
Figura 5.32.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de acero.....	156
Figura 5.33.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de acero después del ensayo a fuego.....	157
Figura 5.34.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de acero después del ensayo a fuego.....	157
Figura 5.35.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y PP.....	158
Figura 5.36.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y PP.....	159
Figura 5.37.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y PP después del ensayo a fuego.....	160
Figura 5.38.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y PP después del ensayo a fuego.....	160
Figura 5.39.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y acero.....	161
Figura 5.40.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y acero.....	162

Figura 5.41.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y acero después del ensayo a fuego.....	163
Figura 5.42.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre probetas con 2% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y acero después del ensayo a fuego.....	163
Figura 5.43.- Comportamiento del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero después del ensayo a fuego.....	164
Figura 5.44.- Pérdidas y aumentos de resistencia en tanto por ciento en hormigones con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego.....	166
Figura 5.45.- Comparativa de la conductividad térmica de probetas cúbicas de hormigón con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero y hormigones sin adición.....	169
Figura 5.46.- Comparación de valores medios de la conductividad térmica (W/mK) en hormigones con adición de 1% de CNFs (GF_1) y del 2% (GF_2), con adición de fibras hibridadas de 1%CNFs y 1% de acero (GF-FA) y con adición de fibras hibridadas CNFs y polipropileno (GF-PP), para una humedad relativa del 50%.....	170
Figura 5.47.- Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de acero en peso de cemento (FA_1).....	174
Figura 5.48.- Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de acero en peso de cemento (FA_2).....	175
Figura 5.49.- Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_1).....	176
Figura 5.50.- Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_2).....	177
Figura 5.51.- Gráfico de interacciones entre la conductividad térmica (W/mK) de hormigones con distintos porcentajes de fibras de acero y fibras de polipropileno.....	179
Figura 5.52.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% y 2% de CNFs entre si.....	181
Figura 5.53.- Sintomatología del ensayo a compresión en probetas de hormigón con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento.....	182

Figura 5.54.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones sin adición.....	183
Figura 5.55.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones sin adición.....	183
Figura 5.56.- Comportamiento de rotura satisfactoria a compresión en probetas de hormigón con 2% de CNFs en peso de cemento.....	184
Figura 5.57.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de polipropileno.....	185
Figura 5.58.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de polipropileno.....	186
Figura 5.59.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de polipropileno.....	187
Figura 5.60.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de polipropileno.....	187
Figura 5.61.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de acero.....	189
Figura 5.62.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de acero.....	190
Figura 5.63.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de acero.....	191
Figura 5.64.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de acero.....	191
Figura 5.65.- Rotura por compresión de probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento.....	192
Figura 5.66.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición híbrida de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno.....	193

Figura 5.67.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición híbrida de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno.....	194
Figura 5.68.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición híbrida de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero.....	195
Figura 5.69.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición híbrida de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero.....	196
Figura 5.70.- Pérdidas y aumentos de resistencia en tanto por ciento en hormigones con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero y hormigones sin adición.....	198
Figura 5.71.- Microscopía electrónica de barrido a 300 aumentos y 20Kv en probetas GF-1%, GF-2% y SA antes y después del incendio.....	201
Figura 5.72.- Microscopía electrónica de barrido a 2000 aumentos 20Kv en probetas GF-1%, GF-2% y SA antes y después del incendio.....	203
Figura 5.73.- Microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos 20Kv en probetas GF-1%, GF-2% y SA antes y después del incendio.....	205
Figura 5.74.- Microanálisis por energía dispersa de rayos X en hormigones con adición de 2%de CNFs en peso de cemento, en lámina delgada a 100 aumentos antes del fuego y después del fuego.....	208
Figura 5.75.- Microanálisis por energía dispersa de rayos X en hormigones con adición de 2%de CNFs en peso de cemento, en lámina delgada a 500 aumentos antes del fuego y después del fuego.....	209
Figura 5.76.- Microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos 20Kv en hormigones con adición de fibra de PP al 1% y 2% en peso de cemento antes y después del ensayo a fuego.....	211
Figura 5.77.- Microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos 20Kv en hormigones con adición de fibra de acero al 1% y 2% en peso de cemento antes y después del ensayo a fuego.....	212

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Características físicas y composición química de los áridos.....	65
Tabla 3.2.- Características físicas y composición química del cemento empleado.....	66
Tabla 3.3.- Características de las fibras empleadas como adición.....	66
Tabla 3.4.- Porcentaje de adición, dosificación en kg/m ³ de cemento y número de probetas realizadas para cada tipo.....	68
Tabla 3.5.- Dosificaciones en peso de las probetas con y sin adición por probeta.....	68
Tabla 3.6.- Nomenclatura probetas con nanofibras de carbono y su hibridación con fibras de acero o con fibras de polipropileno.....	69
Tabla 3.7.- Nomenclatura de las probetas con fibras de acero y fibras de polipropileno.....	69
Tabla 3.8.- Nomenclatura de las probetas sin adición.....	69
Tabla 3.9.- Porcentaje de adición, dosificación en kg/m ³ de cemento y número de probetas realizadas para cada tipo.....	70
Tabla 3.10.- Dosificaciones en peso de las probetas con y sin adición por probeta.....	71
Tabla 3.11.- Nomenclatura probetas cúbicas, sin adición, con fibras de acero y fibras de polipropileno.....	71
Tabla 3.12.- Ensayos realizados en las probetas cilíndricas.....	78
Tabla 3.13.- Ensayos realizados en las probetas cúbicas.....	78
Tabla 3.14.- Ensayos realizados con muestras de corte fresco y lámina delgada extraídos de las probetas cilíndricas antes y después del ensayo a fuego.....	79
Tabla 4.1.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, durante el ensayo a fuego.....	91
Tabla 4.2.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con adición del 2% de CNFs en peso de cemento, durante el ensayo a fuego.....	92
Tabla 4.3.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero, durante el ensayo a fuego.....	93
Tabla 4.4.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, durante el ensayo a fuego.....	93
Tabla 4.5.- Mediciones de las temperaturas en probetas de hormigón con adición de fibras de acero y fibras de polipropileno, durante el ensayo a fuego.....	94
Tabla 4.6.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón sin adición, durante el ensayo a fuego.....	97

Tabla 4.7.- Valores medios más representativos del ensayo a compresión de probetas de hormigón con adición de CNFs, después del ensayo a fuego.....	101
Tabla 4.8.- Valores medios más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero, después del ensayo a fuego.....	103
Tabla 4.9.- Valores medios más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego.....	104
Tabla 4.10.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición del 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, después del ensayo a fuego.....	105
Tabla 4.11.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de acero en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento, después del ensayo a fuego.....	107
Tabla 4.12.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón sin adiciones, después del ensayo a fuego.....	109
Tabla 4.13.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento.....	110
Tabla 4.14.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento.....	112
Tabla 4.15.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento.....	114
Tabla 4.16.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras acero en peso de cemento.....	115
Tabla 4.17.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento.....	117
Tabla 4.18.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón sin adiciones.....	119
Tabla 4.19.- Valores de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de CNFs, con adición hibridada de CNFs con fibras de acero y adición hibridada de CNFs con fibras de polipropileno, a 20°C y 50% de humedad.....	120

Tabla 4.20.- Valores de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, adición de fibras de polipropileno y sin adición, a 20°C y 50% de humedad.....	121
Tabla 5.1.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) en hormigones con adición de 1% de CNFs (GF_1) y del 2% (GF_2), con adición de fibras hibridadas de 1%CNFs y 1% de acero (GF-FA) y con adición de fibras hibridadas CNFs y polipropileno (GF-PP), para una humedad relativa del 50%.....	171
Tabla 5.2.- Prueba de rangos múltiples para la conductividad (W/mK) en hormigones con adición de 1% de CNFs (GF_1) y del 2% (GF_2), con adición de fibras hibridadas de 1%CNFs y 1% de acero (GF-FA) y con adición de fibras hibridadas CNFs y polipropileno (GF-PP), para una humedad relativa del 50%.....	172
Tabla 5.3.- Valores de la conductividad térmica en hormigones con adición de 1%-2% de fibras de acero, con adición de 1%-2% de polipropileno y sin adición, a 20°C y 50% de humedad.....	173
Tabla 5.4.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de acero en peso de cemento (FA_1).....	174
Tabla 5.5.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de acero en peso de cemento (FA_2).....	175
Tabla 5.6.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_1).....	176
Tabla 5.7.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_2).....	177
Tabla 5.8.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) con dos factores: tipo de fibra y proporción de la misma.....	179

SIGLAS Y NOTACIONES

ACI	American Concrete Institute
δ	Carrera
CNFCC's	Sensores de daños estructurales
CNFs	Nanofibras de carbono
CFRP	Compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono
CNTs	Nanotubos de carbono
d_f	Diámetro equivalente
E_{max}	Densidad de energía de deformación máxima
E_{ult}	Densidad de energía de deformación última
ϵ_{max}	Deformación máxima del hormigón
ϵ_{ult}	Deformación última del hormigón
λ	Esbeltez
FA	Fibras de acero
F	Fuerza en kN
FCR	Hormigón reforzado con fibra
GNS	Nanoláminas de grafeno
GO	Óxido de grafeno
GP	Grafito artificial
GSS	Hojas de grafeno
HM	Hormigón en masa
HRFA	Hormigón reforzado con fibra de acero
HSC	Alta resistencia
L_f	Longitud de fibra

MSF	Microfibras de acero
NSC	Hormigones de resistencia normal
PP	Fibras de polipropileno
PDMS	Polidimetilsiloxano flexible
q_f	Carga de fuego por unidad de superficie construida
q_t	Carga de fuego por unidad de superficie construida incluidas sus aberturas
RC	Estructuras de hormigón armado
SA	Sin adición
SCC	Hormigón auto-consolidado
SCR	Hormigón reforzado con acero
SFRC	Fibra de acero de hormigón reforzado
SHCC	Cemento reforzados a tracción con adición de óxido de grafeno
S	Eficiencia de las fibras
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensión máxima
$\sigma_{\acute{u}lt}$	Tensión última
UHPFRC	Hormigón reforzado con fibra de alta resistencia a fuego

CAPÍTULO 1.- OBJETIVOS

1.1.- Motivación

Durante la última década se ha producido un importante desarrollo en el campo de los nanomateriales, desarrollo que ha alcanzado a la tecnología del hormigón, y por tanto, a las técnicas de diseño y de cálculo. El material más empleado en obras de ingeniería dentro de estas nuevas tecnologías se encuentra en un lugar muy destacado, y su interacción con el empleo de adiciones a nano escala se convierte en una realidad incipiente.

El hormigón tiene muchas ventajas y argumentos a su favor, a pesar de sus carencias, como su baja relación entre la resistencia a tracción y compresión y su baja capacidad para absorber energía antes de la rotura, entre otras. Su durabilidad es muy sensible al proyecto y ejecución, por ello, se busca que los hormigones innovadores resultantes tengan un balance más satisfactorio entre las propiedades mecánicas obtenidas, teniendo en cuenta el coste de fabricación.

Los edificios ejecutados con estructura de hormigón armado son los que tienen un mayor número de realizaciones, donde la tipología más empleada es la compuesta por pilares como elemento sustentante. La probabilidad de afectación por incendio en una estructura de hormigón es elevada, por ello, conseguir una mejor respuesta ante una exposición directa al fuego del material que incorpora nanofibras fibras y fibras, resulta francamente interesante.

Surge la necesidad de dar paso a un nuevo material a partir de la incorporación de adiciones para conseguir minimizar las carencias del hormigón tradicional y optimizar las ventajosas cualidades que ya existían.

Un mejor comportamiento de la durabilidad de las estructuras de hormigón es claramente demostrado con la adición de fibras, en cambio, pocas son las investigaciones que estudian los procesos de mejora en la resistencia del hormigón cuando se mezcla con nano materiales y su capacidad resistente residual ante una exposición directa a fuego.

1.2.- Objetivo principal

El objetivo principal del trabajo, es estudiar el efecto que confiere la incorporación de nanofibras y fibras al hormigón estructural cuando está expuesto al fuego, en comparación con hormigones empleados habitualmente.

En las siguientes páginas de esta investigación se procederá a realizar un estudio de los efectos que provoca una exposición al fuego en el hormigón con diferentes adiciones (nanofibras de carbono (CNFs), fibras poliméricas y metálicas), así como el análisis de sus características mecánicas, estéticas y funcionales después de una agresión térmica.

Bajo esa premisa, se estimará la capacidad resistente residual de una estructura de hormigón con diferentes adiciones y su resistencia a compresión, antes y después de una importante exposición al fuego frente a un hormigón tradicional de referencia.

1.3.- Objetivos secundarios

Se establece como objetivo, desde un punto de vista más ambicioso, conseguir crear un elemento estructural con mejor comportamiento mecánico, a partir de la incorporación de adiciones que nos permita dimensionar elementos estructurales de menor sección para la misma carga, mayor durabilidad y comportamiento frente al fuego, para diseñar edificios aún más ligeros y con menor superficie de ocupación de la estructura, lo que desembocaría en proyectos con mejor viabilidad económica.

CAPÍTULO 2.- ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS

2.1.- Introducción

Decía el célebre arquitecto e ingeniero militar Vitrubio en su obra “De Arquitectura”, que los materiales para construir debían ser “resistentes, útiles y bellos” (Ortíz 1787). En la actualidad, el Eurocódigo describe de la misma manera, que los materiales deben mantener su capacidad resistente, durabilidad y respuesta a agentes externos agresivos (EUROCODE 2 – EN 1992 2004; EHE-08 2010).

Con estas premisas mantenidas en el tiempo, resulta de vital importancia conocer en profundidad el comportamiento de los materiales, puesto que elegir el material más adecuado influirá decisivamente en el rendimiento óptimo de los elementos constructivos.

Conocer las propiedades físicas, tecnológicas y mecánicas del material a utilizar, así como los diferentes procesos que conlleva su fabricación, nos ayudará en la debida elección de los mismos. El conocimiento mediante ensayos, nos ayuda a comprobar si los materiales resistirán a las sollicitaciones del diseño deseado, comprobando las prestaciones tanto internas como externas a las que queremos someterlo, sus cambios y variaciones. La intención última no es otra que conocer la bondad del material, analizando el comportamiento frente a los cambios de temperatura y cargas que pueda experimentar, las condiciones en las que esté trabajando el elemento y elegir el tipo de material más idóneo para el tipo de trabajo que va a realizar.

El objetivo de todo especialista dedicado a la construcción es conseguir que sus obras sean duraderas, resistentes y lo más económicas posibles. Por esto es necesario que las obras estén construidas con materiales que también cumpla con esta máxima: duraderas, resistentes y económicas.

El descubrimiento del hormigón en el siglo XIX ha marcado las pautas en el desarrollo de la construcción, debido a sus ventajas fundamentales de alta resistencia a compresión en estado endurecido y la adecuada trabajabilidad, que permite su colocación bajo diferentes condiciones de moldeado.

Su composición a partir de áridos gruesos y finos, un material conglomerante, fundamentalmente el cemento y agua, lo convierte en un material relativamente económico. Otras muchas ventajas son propias de este material y por ello, se continúa estudiando e investigando para lograr mejorarlo. Posee también desventajas, como su debilidad a resistir tracciones, lo que ha planteado un sin fin de limitaciones hasta la aparición del hormigón armado, siendo en la actualidad el material estructural más empleado (Fernández Cánovas 1964).

En los últimos años, el análisis y estudio del empleo de los hormigones innovadores ha ganado en actualidad y está presente, en los foros científicos nacionales e internacionales del sector de la construcción, donde las diferentes adiciones y aditivos en el hormigón, permiten adquirir unas prestaciones no imaginables hace tiempo.

2.2.- La invaluable oportunidad en el campo de los nanomateriales: “el grafeno”

2.2.1.- Características del grafeno y procesos de obtención

El carbono es uno de los elementos químicos más importantes en la naturaleza, lo encontramos en todos los seres vivos y según se distribuyan sus átomos, puede formar sustancias con distintas características. A partir del carbono se consigue el grafito y a partir de éste, se obtiene grafeno.

El grafeno es conceptualmente una nueva clase de material prometedor que se presenta físicamente en un sólo átomo de grosor y, sobre esta base, ofrece nuevos caminos en la física de bajas dimensiones (figura 2.1).

Figura 2.1.- Representación de la lámina de grafeno y sus derivados

Fuente: <https://www.graphenano.com/wp-content/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>.

El grafeno surge cuando pequeñísimas partículas de carbono se agrupan de forma muy densa en láminas de dos dimensiones muy finas, alcanzando dimensiones del tamaño de un átomo y éstos se disponen en forma

de un patrón regular hexagonal similar al grafito, produciéndose un material tan ligero, que una lámina de 1 metro cuadrado pesa tan sólo 0,77 miligramos.

Los átomos se encuentran unidos entre sí por fuertes enlaces formando una red hexagonal, colocados en los vértices de una red tipo panal de abejas. Es la membrana existente más fina posible. Con un solo gramo de grafeno bastaría para cubrir totalmente un campo de fútbol, con una apariencia de tela transparente y flexible, a la par que extremadamente resistente (figura 2.2).

Figura 2.2.- Estructura molecular del grafeno

Fuente: <https://erenovable.com/que-es-el-grafeno-el-material-del-futuro/>

El grafeno es un material que combina una gran cantidad de propiedades que no se dan juntas en ningún otro compuesto, siendo capaz de mejorar por completo las condiciones de cualquier superficie donde se aplique. Y es que se trata de un material muy duro, resistente, flexible y muy ligero; lo que permite moldearlo según las necesidades de cada caso. Conduce muy bien tanto el calor como la electricidad y permanece en condiciones muy estables cuando se le somete a grandes presiones.

La laminación es el método tradicional para la obtención del material, se conseguía inicialmente, pegando y despegando una tira de cinta adhesiva en un trozo de grafito, de este modo se conseguía grafeno de muy alta calidad, pero la cantidad producida era mínima y resultaba insuficiente para su uso industrial.

Actualmente, los fragmentos de grafeno se colocan en una plancha metálica para formar láminas mayores y son arrancadas posteriormente. El empleo de otros métodos para su obtención enfocados en aumentar la cantidad producida no consigue un producto con la calidad suficiente. En el presente, se comercializa el grafeno en forma de lámina y en polvo. El grafeno en lámina es de alta calidad y se emplea en campos como la electrónica, la informática o

incluso la aeronáutica, donde se alcanza un material muy resistente, aunque su producción es muy costosa.

En cambio, el grafeno en polvo se usa en aquellos ámbitos que no requieren de un material de tan alta calidad. Su proceso de obtención es más barato y permite una mayor producción del producto, pero renunciando a parte de sus propiedades.

El método químico de producción de grafeno, a día de hoy, es el más adaptable a su explotación industrial, porque permite sintetizarlo con más facilidad y en mayores cantidades. Pero, para producirlo de esta forma, hasta ahora era necesario partir de grafito (Graphenano nanotechnologies 2017).

Investigadores españoles dependientes del Grupo de Materiales Compuestos del Instituto Nacional del Carbón (INCAR-CSIC) han patentado una tecnología desarrollada en Asturias que permite obtener grafeno a partir del coque, un producto derivado del carbón y el petróleo, a un coste mucho menor que el proceso actual con grafito, cuya síntesis requiere menos temperatura y está disponible a menores precios. Mientras que para obtener grafito es necesario alcanzar temperaturas de 2500 °C a 2800 °C, el coque que utilizamos sólo requiere temperaturas en torno a 1000 °C, con la consiguiente reducción de consumo energético, sin afectar a la calidad del producto final (<http://www.rtve.es/noticias/20130717/patentan-tecnologia-espanola-para-obtener-grafeno-bajo-coste/717260.shtml> 2013).

El grafeno en polvo se utiliza en aplicaciones que requieren un material más barato, como composite para construcción, mezclándolo con otros materiales. El proceso de producción de grafeno en formato polvo básicamente parte del grafito como materia prima y consiste en realizar una oxidación violenta y un proceso de ultrasonificación para separar las pequeñas láminas de grafeno que componen el grafito. Sus propiedades no son tan buenas como el grafeno en lámina y conduce peor la electricidad. La demanda de este producto, cuyo precio depende de su pureza, sigue siendo pequeña. El de baja calidad cuesta menos de 10 euros el gramo mientras que el de alta calidad ronda un precio próximo a los 100 euros.

(<http://www.elmundo.es/elmundo/2012/04/13/nanotecnologia/1334331314.html>, 2012)

Por ahora se tiene poco conocimiento en cuanto a la experiencia en su aplicación en la edificación, pero podemos identificar sus características principales y aventurarnos en imaginar hasta qué punto cambiará nuestras vidas. Dadas sus características, este material puede influir en las técnicas de construcción de nuestro patrimonio, así como causar igualmente una revolución a la hora de concebir nuestras edificaciones.

Este novedoso material podría llegar a serlo todo o quedarse absolutamente en nada, siendo un material que se encuentra en plena fase de experimentación, con miles de usos y aplicaciones posibles. Nos aporta unas características tan singulares, que nos puede proporcionar nuevos resultados en el campo de las estructuras de hormigón armado dando lugar a nuevos sistemas constructivos, pudiendo ser el sustitutivo del acero corrugado para su integración con el hormigón en la ejecución de las estructuras de hormigón.

2.2.2.- Evolución histórica del grafeno

Como se ha comentado con anterioridad, es el más fascinante de los materiales descubiertos hasta la fecha, siendo llamado “el material del futuro” y que tiene su origen en un elemento muy presente en nuestra naturaleza como es el carbono.

Pese a que el grafeno se conoce desde principios del siglo XX, fue abandonado por considerarlo demasiado inestable. No fue hasta muchos años después, en 2004, cuando en la Universidad de Manchester, Reino Unido, a manos de los profesores Andre Geim y Konstantin Novoselov, cuando aparece la serendipia de lo que llamaron grafeno. Jugando con un lápiz, pegaron un celo en unos borrones hechos con el lápiz, cogieron el “fixo” de toda la vida con los polvos de la mina del lápiz, lo pusieron en el microscopio y descubrieron que eso que veían era un material bidimensional compuesto de átomos de carbono. Cuando más tarde lo consiguieron aislar a temperatura ambiente, comprobaron sus enormes cualidades y este descubrimiento se convirtió en Premio Nobel en 2010 (<https://www.infografeno.com/>).

La noticia del grafeno surgió con dos artículos de la revista Science por un grupo de investigación cuyo objetivo no era la búsqueda del grafeno, sino la de lograr láminas lo más delgadas posibles de materiales en general. El problema de crear láminas muy finas en la escala nanométrica, era la pérdida de propiedades de los materiales. Pero al probar con el grafito, vieron que era muy fácil conseguir capas muy finas de hasta un átomo de grosor, como comprobarían tiempo después. Pero además destacaba, por poderse

manipular fácilmente sus propiedades eléctricas. El grafeno pasaría a ser un material muy prometedor, aunque habría que trabajar mucho para que los proyectos pudieran hacerse realidad.

El siguiente gran reto en la historia de este mineral es la búsqueda de un método de obtención del mismo a precio razonable. Diversos equipos de científicos en todo el mundo dedican sus esfuerzos a este fin y aunque los resultados obtenidos son prometedores, aún queda camino por recorrer.

El principal obstáculo que presenta el grafeno en la actualidad es su producción, ya que no es posible fabricar grafeno a gran escala. Pese a ello, son muchas las compañías que han apostado por este material y que han invertido mucho tiempo en la investigación, con lo que nos lleva a pensar que será más pronto que tarde cuando veamos sus aplicaciones integradas en nuestro patrimonio y en nuestro entorno más cercano (Geim André 2008).

La fiebre del grafeno está en marcha, cuándo se abaraten los costes de producción y se lance la carrera comercial, en la que muchas empresas ya están tomando posiciones a base de patentes, se integrará en nuestra vida cómo en su día lo hizo la revolucionaria industria del plástico.

Aunque no supera los 10 años de edad, el grafeno se ha postulado como el material llamado a revolucionar la industria de todo el mundo. Cientos de investigadores han dedicado esta última década a estudiar sus propiedades y sus posibles utilidades. La clave está en encontrar un método de extracción de grafeno sostenible y escalable. El mercado de este material aún es muy pequeño, y para que sea económicamente viable, las propiedades de un material nano hay que trasladarlas a nivel macro y para ello es necesario desarrollar una química sostenible.

2.2.3.- Aplicaciones del grafeno y sus derivados

Es evidente, el gran impacto que los últimos avances en el campo de los nanomateriales está teniendo en la comunidad científica. Actualmente a partir del grafeno existe una gran oportunidad de desarrollar nuevos materiales que permitan conseguir mejores prestaciones para la construcción de edificios. La búsqueda de nuevos elementos y sistemas nunca deja de sorprender, y sigue ofreciendo un terreno fértil para las diferentes aplicaciones en el mundo de la edificación.

Actualmente se están llevando a cabo importantes avances en la nanoescala de los materiales, donde aparece un nuevo material llamado

“grafeno”. Cuando nos adentramos en el conocimiento de las características y las aplicaciones para las cuales se está destinando este nuevo material, apreciamos que existen muchos estudios a nivel teórico y que la mayoría de sus aplicaciones se centran en el mundo de la tecnología, la informática o la medicina y no tanto en el ámbito de la edificación.

Este material de dos dimensiones exhibe excepcionalmente calidad electrónica y tiene varias aplicaciones potenciales. Los trabajos de investigación en relación con el grafeno están aumentando rápidamente en la ciencia de los materiales, la física de la materia condensada y la física de estado sólido. El grafeno y los materiales derivados del grafeno han atraído una gran atención debido a sus propiedades únicas de alta flexibilidad mecánica, gran área superficial, estabilidad química, conductividades eléctricas y térmicas superiores y los convierten en grandes opciones para la fabricación de diferentes aplicaciones (Sekhar 2015).

Las posibilidades de este material son infinitas, dado que es el más fino que existe, con láminas de un solo átomo de grosor. Posee unas cualidades nunca encontradas antes en otro material, tales como la conductividad eléctrica, siendo mucho mejor que el cobre, y una resistencia y flexibilidad entre 100 y 300 veces mayor que el acero.

Pese a que el grafeno aún se encuentra en fase de estudio y no se conocen todas las oportunidades que ofrece, y muchos de los usos aún son hipotéticos, otros sin embargo, se encuentran en una fase avanzada de investigación y se prevé que las posibilidades de su utilización afectarán a prácticamente todos los campos conocidos, sustituyendo a gran parte de los materiales empleados hoy en día (Heersche et al. 2007).

Las aplicaciones que se le pueden dar, sin ser infinitas, son numerosas. Algunos de los increíbles usos con los que se está experimentando actualmente son la fabricación de microchips en el ámbito de la electrónica, que permitirá hacer pantallas de móviles flexibles y baterías de larga duración y corto tiempo de carga (figura 2.3).

Figura 2.3.- Aplicaciones del grafeno

Fuente: <https://quimica-iti-12-13.wikispaces.com/Descubrimiento+y+repercusi3n+del+Grafeno>

La informática será uno de los sectores más involucrados con este material, pues permitirá el desarrollo de ordenadores mucho más rápidos y con un menor consumo eléctrico que los actuales de silicio. Se estima que un disco duro de este compuesto, del mismo tamaño que uno de los empleados actualmente, podría almacenar hasta mil veces más información (figura 2.4).

Figura 2.4.- Aplicaciones informáticas del grafeno

Fuente: <http://es.globedia.com/grafeno-material-milagroso-enciende-carrera-electronica-futuro>

En el ámbito sanitario, se pretende crear las válvulas cardíacas y las prótesis de grafeno. Además, las energías renovables pasarán a un plano más relevante, ya que, las placas solares recubiertas de este material serán mucho más eficientes y permitirán una forma más ecológica. Se conseguirá una gran eficiencia en la conversión de la luz del sol en electricidad, y por supuesto en la industria de la construcción de edificios (<http://2gv.es/reflexiones/grafeno-nuevo-material-para-la-edificacion/>).

El sector energético, es otro ámbito de los que cambiarán de manera visible. Por sus propiedades energéticas, el grafeno permitirá la creación de baterías de larga duración que apenas tardarán unos segundos en cargarse.

La extrema dureza del grafeno, unida a su capacidad de moldearse y a su ligereza, lo hace un compuesto ideal para ser empleado en esta industria. Chalecos antibalas, cascos y multitud de elementos de protección que se emplean por diversos profesionales pasarán a ser mucho más ligeros y seguros. Estudios experimentales demuestran las propiedades eléctricas del grafeno y sus derivados (grafeno exfoliado, grafeno sintetizado por CVD, óxido de grafeno y óxido de grafeno hidrogenado). Se alcanza una fuerte sensibilidad de los sensores de tensión y se muestra una capacidad de respuesta significativamente mayor que con otros materiales. La reproducibilidad y la fiabilidad en las respuestas de las muestras a base de grafeno las convierten en un buen candidato para usar en los sensores de tensión (Hosseinzadeh et al. 2018).

Rafael Ferritto, fundador y director general de la empresa NanoInnova, se ha propuesto revolucionar áreas tan dispares como la construcción o la limpieza de las costas, consiguiendo derivados químicos del grafeno para poder utilizarlo en la industria. Actualmente han desarrollado una tecnología para descontaminar suelos de forma magnética, gracias a la mezcla del grafeno y otras sustancias. El aditivo creado por NanoInnova se esparce por una playa que esté contaminada, por chapapote, por ejemplo, y consigue que las sustancias tóxicas se adhieran a ese aditivo. De esa manera, utilizando solo un imán se puede separar la arena de las sustancias contaminantes. Ya existen aproximaciones para descontaminar también el agua, esponjas de grafeno que absorben aceites y aditivos para pinturas, cuyas propiedades protectoras se multipliquen exponencialmente. La compañía actualmente se dedica también a la venta de grafeno en pequeños botes para que sea estudiado por científicos de todo el mundo, donde el 95 % de sus ventas acaban fuera de España (<http://www.nanoinnova.com/Home/RD>).

En el ámbito experimental, la empresa vasca Graphenea Nanomaterials lidera la producción de grafeno en lámina de alta calidad enfocada a prototipos, compitiendo al más alto nivel con una empresa coreana y otra norteamericana.

Debido a que el grafeno tiene una resistencia 200 veces superior al acero, permite pensar en crear un nuevo acero inoxidable, dadas las propiedades conductoras e hidrófobas del material, que ayude a prevenir la corrosión al rechazar el agua y detener las reacciones electroquímicas que transforman el hierro en óxido férrico. Aplicado en forma de pinturas en las fachadas, permite crear superficies formadas por finas capas flexibles, capaces de absorber luz solar y producir electricidad suficiente para competir con los paneles solares

convencionales. El nuevo material está formado por varias capas de materiales, con el que podría llegar a fabricarse una pintura solar muy eficiente que incluso tendría la capacidad de cambiar de color. Composites para materiales en revestimientos de fachadas y de interior, gracias a su ligereza y extraordinaria flexibilidad unida a su resistencia, formarán parte de acabados para fachadas, ya que además se puede mezclar con elementos inorgánicos sin deteriorarse (<https://www.graphenea.com/>).

Una de las mayores revoluciones propuestas por Nannoinnova se centra en el mundo de la construcción gracias a un aditivo para los hormigones. Uno de los principales problemas de los hormigones es que se agrietan y no guardan superficies homogéneas. El aditivo descubierto permite solventar el agrietamiento del hormigón y aligerarlo. Además, desde el punto de vista mecánico, también permite mejorar sus propiedades. Según sus cálculos, podrían conseguir este hormigón de calidades extraordinarias por menos de dos euros el kilogramo.

2.3.- La influencia del fuego en las estructuras de hormigón armado

2.3.1.- El hormigón armado como material estructural

El hormigón es el material estructural más importante en la edificación, al que se le exige durabilidad, estabilidad, resistencia y una buena respuesta frente al fuego, evitando la aparición de deformaciones y pérdida de rigidez (Vega y Burón 2007; Ring et al. 2014).

El hormigón está formado por la mezcla básicamente de cemento, áridos y agua. El cemento es un conglomerante hidráulico que posee la propiedad de endurecer al contacto con el agua. Los materiales de base de cemento, en concreto el hormigón, es un material heterogéneo y anisótropo.

El hormigón armado se convirtió en el material constructivo por excelencia en el siglo XX y está muy presente en nuestro siglo, ya que resuelve un universo grande de problemas, aunque aún posee algunas restricciones ligadas básicamente a la no homogeneidad del material. Salvadas las deficiencias en la fisuración y en el comportamiento a tracción gracias a la incorporación de armaduras, su alto peso específico se convierte en un freno básico para su primacía en el siglo XXI.

Nos encontramos el hormigón en varias formas y a menudo agrupados en diferentes categorías en función del peso, resistencia, presencia de fibras (como hormigón sin fibras y reforzado con fibra), y rendimiento (como

convencional y de alto rendimiento hormigón). Los expertos de seguridad contra incendios subdividen los hormigones según la composición del árido principal, existiendo hormigón silíceo y carbonato (piedra caliza). Además, cuando una pequeña cantidad de fibras discontinuas (acero o polipropileno) se agrega al hormigón para mejorar el rendimiento, este hormigón es denominado hormigón reforzado con fibras (FRC). Tradicionalmente, la resistencia a la compresión del hormigón utilizado está comprendida entre 20 MPa y 50 MPa (NSC). En los últimos años, existen distintos tipos de hormigón con una resistencia a compresión en el rango de 50 MPa a 120 MPa y que se conocen como de alta resistencia (HSC). Cuando la resistencia a la compresión excede de 120 MPa, a menudo se lo denomina hormigón de ultra alta resistencia (UHP). Dependiendo de la densidad, los hormigones son generalmente clasificados en dos grupos principales: hormigones con densidades en el rango de 2150 kg/m³ a 2450 kg/m³; y hormigones ligeros con densidades entre 1350 kg/m³ y 1850 kg/m³ (Jiménez Montoya et al. 2000).

Una de sus principales ventajas como material estructural, es la buena resistencia al fuego con respecto a otros materiales empleados en construcción (Kodur y Raut 2010). Este excelente comportamiento del hormigón frente al fuego se debe a la resistencia de los materiales que lo conforman (cemento y áridos) que, cuando se combinan químicamente, forman un material que es esencialmente inerte y tiene baja conductividad, además de alta resistencia a la degradación y a la meteorización. El comportamiento de un elemento estructural de hormigón expuesto al fuego depende, en parte, de las propiedades térmicas, mecánicas y de deformación (Farmington 2008). Estas propiedades varían en función de la temperatura y dependen de la composición y características del hormigón utilizado. Las propiedades del hormigón de alta resistencia (HSC) varían de forma diferente con la temperatura, que los hormigones de resistencia normal (NSC), siendo esta diferencia más pronunciada en las propiedades mecánicas, donde se ven afectadas tanto la resistencia como el contenido de humedad, la densidad, la velocidad de calentamiento y la porosidad (ASTM E119-08b 2008).

El hormigón armado, gracias a su baja conductividad térmica, presenta una buena respuesta ante las altas temperaturas de un incendio. Los factores que tienen más relevancia en este comportamiento son la relación agua-cemento y el espesor del recubrimiento de las armaduras, así como una cuidada terminación superficial que no presente fisuras y grietas, evitando la penetración del calor.

2.3.2.- Los efectos del fuego en edificación

Los edificios están potencialmente expuestos a la acción accidental de un incendio, que puede ocasionarles pequeños daños o llevarlos a su destrucción total. El incendio puede provocar daños muy diferentes oscilando desde el simple manchado ocasionado por el humo y el calor, hasta la total destrucción del edificio por combustión o por pérdida de resistencia de su estructura.

Con frecuencia, después de los incendios, suele haber deficiencia de servicios (electricidad, agua caliente, etc.), por haberse vistos afectados por la agresión térmica. Por otro lado, la estabilidad del edificio depende del comportamiento de los elementos estructurales frente al desarrollo de un incendio, ya que el enorme calor y las elevadas temperaturas, pueden provocar el colapso de los mismos (figura 2.5) (Farmington 2007).

Figura 2.5.- Incendio en edificación

Fuente: http://info7rm.blob.core.windows.net/optimalcdn.com/images/2016/11/09/473528_incendio-edificios-boston.jpg

Los efectos del fuego sobre los elementos estructurales se llevan investigando desde hace más de cincuenta años y se conoce que las altas temperaturas alcanzadas durante un fuego afectan al comportamiento de las estructuras, ya que disminuyen las propiedades mecánicas de los materiales y redistribuyen sus cargas, como consecuencia de las dilataciones impuestas que, al no ser en general libres, originan concentraciones de tensiones (Cristofano y Martin 1989).

El fuego a escala real o “grande” en un edificio varía según el balance de masa y energía dentro del local donde se produce. La energía desprendida depende de la cantidad y tipo del combustible y de las condiciones de ventilación existentes. Se desarrolla en tres fases, que son: crecimiento, desarrollo máximo y final. El incremento más rápido de la temperatura se produce en un período posterior al punto de inflamación, punto en el que todos los materiales se queman espontáneamente y se alcanza un fuego totalmente desarrollado en el que todas las superficies combustibles existentes en un determinado espacio participan en el fuego (UNE-EN 1991-1-2:2004). En la figura 2.6 se muestra el comportamiento de un incendio.

Figura 2.6.- Fases de un fuego natural, comparando temperaturas atmosféricas con la curva estándar de fuego ISO 834

Fuente: <http://2.bp.blogspot.com/-TgdJ3izZCNw/VrKuWMSMnqI/AAAAAAAAADc/AtmWMZT-Hc4/s1600/ccf.jpg>

La resistencia última al fuego de una estructura, depende de la resistencia al fuego del material constituyente, al margen de protecciones u otros medios que impidan el efecto directo del fuego a la estructura. Desde el punto de vista de la estabilidad estructural y con ánimo de aproximarnos a la percepción del momento de colapso del elemento, nos centraremos en un método de ensayo que se adapte lo mejor posible al comportamiento real de la estructura, que simule los soportes de un edificio de estructura de hormigón, para conocer así su comportamiento. Por tanto, la resistencia al fuego, es la duración durante la cual un elemento estructural muestra resistencia con respecto a la integridad estructural, la estabilidad y la transmisión de temperatura (Purkiss 1988).

La resistencia al fuego de un material se mide convencionalmente y de forma universal siguiendo el método más utilizado y establecido por la norma ISO 834-11:2014 y su curva normalizada temperatura-tiempo, donde la acción del fuego se simula mediante un programa-patrón basado en el potencial calorífico. Aunque existen otros métodos de conocer la resistencia al fuego como la norma ASTM E119, la de hidrocarburos, y la de fuego exterior. En fuego real y directo, influyen muchos parámetros, entre otros la cantidad y tipo de material combustible, la configuración y distribución de la carga de fuego, la geometría y tamaño del fuego y las condiciones de ventilación.

El origen de los daños en los edificios es principalmente por elevación de la temperatura por encima de los 280 °C y el tiempo de duración. El fenómeno de la temperatura está relacionado con la carga de fuego que contenga el edificio, tratándose de la suma de las energías caloríficas que se liberan en la combustión de todos los materiales combustibles existentes en un espacio (contenidos del edificio y elementos constructivos)(UNE-EN 1991-1-2:2004). La cantidad de combustible susceptible de entrar en combustión, alcanza un nivel térmico que se denomina carga de fuego, expresada en megajulios (MJ). La carga de fuego por unidad de superficie construida “ q_f ”, o por unidad de superficie de toda la envolvente, incluidas sus aberturas “ q_t ”, se denomina densidad de carga de fuego y será decisiva en el comportamiento del incendio (UNE-EN 1991-1-2:2004).

A continuación, en la figura 2.7 se muestra el comportamiento de un incendio normalizado a partir de la curva tiempo-temperatura paramétrica: determinada a partir de modelos de fuego y de los parámetros físicos específicos que definen las condiciones del sector de incendio, haciendo uso de un valor promedio de diferentes tipos de incendio (UNE-EN 1991-1-2:2004).

Figura 2.7.- Temperaturas de la curva normalizada tiempo-temperatura ISO-834

Fuente: http://prevencionrimac.com/bitportal/Cms_Data/Contents/RiesgosPatrimonialesDataBase/Media/causa-siniestros/incendio/curvas-de-fuego.png

Los efectos más graves del fuego tienen lugar en la transición de la primera a la segunda fase del desarrollo de un incendio, donde se pueden alcanzar temperaturas de hasta 1250 °C.

La capacidad de un elemento estructural, para permanecer durante un tiempo determinado bajo la acción de un fuego ejerciendo las funciones para las que fue diseñado, nos aporta la idea de resistencia al fuego. Esta resistencia se mide convencionalmente y de forma casi universal siguiendo el método normalizado por la norma ISO-834. Esta capacidad de los elementos para poder hacer frente a este tipo de agresión térmica, es lo que determina que un edificio, tras un incendio, quede intacto o alcance una lesión de mayor o menor gravedad.

La temperatura crítica es la temperatura del material a la cual el elemento estudiado deja de ser capaz de mantener las condiciones de resistencia mecánica, aislamiento térmico, estanquidad a las llamas y ausencia de emisión de gases inflamables o tóxicos. Es decir, la temperatura a la que se alcanza alguno de los estados límites: colapso, deformación excesiva, integridad y aislamiento.

Como es natural, cuanto mayor sea la resistencia al fuego de los elementos constructivos y del conjunto de la estructura, mejor soportará un edificio las consecuencias de un incendio. Es importante mencionar, que lograr conclusiones exactas de las consecuencias del fenómeno del fuego en un edificio no es posible, pues en un incendio existen un número excesivo de variables que cambian notablemente de una ocasión a otra.

La capacidad resistente residual de una estructura en uso, dañada por una agresión térmica, se puede definir como la aptitud para soportar las cargas que actúan sobre ella en el momento considerado. Es importante conocer la relación de capacidad residual de la estructura dañada y la nominal o de proyecto original, ya que es lo que nos va a dar el coeficiente de seguridad por comparación, pudiendo establecerse para cada elemento estructural, como vigas, pilares, etc., (Fernández Cánovas 1994).

El valor mencionado del tiempo de resistencia al fuego no indica, por lo tanto, el tiempo real en el que un elemento de un edificio pueda resistir, sino que es una comparación relativa, e indica la severidad del fuego bajo el cual un elemento puede resistir (Harmathy 1993).

. Debido a que el fuego representa una severa condición ambiental a la que la estructura puede ser sometida, la provisión de seguridad contra incendios debe ser lo más apropiada posible, a partir de medidas para los elementos estructurales, teniendo en cuenta este aspecto en el diseño de la construcción (Buchanan, Wiley y Chichester 2002).

Para asegurar un buen comportamiento estructural frente a la acción del fuego, las estructuras se diseñan principalmente en base a procedimientos normalizados que permiten asegurar la estabilidad estructural durante un periodo de tiempo suficiente que permita a la gente escapar y a los servicios de emergencia actuar para extinguirlo (Anchor, Malhotra y Purkiss 1986).

Cuando se utiliza el hormigón como elemento estructural, éste tiene que satisfacer los requisitos de seguridad contra incendios especificados en las siguientes instrucciones: EN 1991-1-2: Actions on structures y EN 1992-1-2: Design of concrete structures, y en la EHE (Instrucción del Hormigón estructural).

Actualmente el nuevo Código Técnico de la Edificación, con su Documento Básico sobre Seguridad en caso de Incendios, contribuye con un nuevo enfoque en relación a los incendios en los edificios, lo cual demuestra su

importancia y actualidad (DBSI CTE 2006). El dimensionado de un elemento estructural frente a la acción del fuego implica satisfacer los requisitos de las normativas nacionales al respecto para un período de tiempo designado, aplicando la curva de fuego apropiada. En caso de incendio se deberán considerar dos tipos de acciones: térmicas y mecánicas. Estas se resuelven de forma desacoplada y se comprueba la seguridad de la estructura en cuestión, que es el objetivo básico del dimensionado. Las estructuras, por lo tanto, deben de satisfacer una serie de criterios que nos permitan asegurar las funciones requeridas para una determinada exposición al fuego y durante un periodo de tiempo establecido según las normativas estatales. Estos criterios son:

- Criterio de aislamiento térmico “I”: criterio por el que se verifica la capacidad de un elemento de compartimentación para evitar la transmisión excesiva de calor.
- Criterio de integridad “E”: criterio por el que se asegura la capacidad de un elemento de compartimentación para prevenir el paso de las llamas y los gases calientes.
- Criterio de resistencia “R”: criterio por el que se asegura la capacidad de una estructura para soportar cargas durante la acción del fuego indicado.

Dependiendo de las funciones del elemento estructural analizado, se le va a requerir el cumplimiento de unos criterios u otros para asegurar la resistencia al fuego.

Sin embargo, no se termina de prestar atención al comportamiento de las estructuras después de un fuego. A pesar de que no haya sufrido un colapso general, puede que haya sufrido daños irreversibles y deba ser reemplazada o bien llevar a cabo en ella reparaciones parciales, teniendo muy presente el aspecto económico. En algunos casos, es inevitable provocar la demolición de la estructura antes que realizar las reparaciones necesarias (Merchán 2000).

2.3.3.- Comportamiento del hormigón frente al fuego

2.3.3.1.- Evolución de los efectos del fuego en las estructuras de hormigón armado

La evolución de la temperatura en el interior de los elementos estructurales de hormigón como consecuencia de su exposición al fuego se calcula a partir de las acciones térmicas sobre la superficie de los elementos estructurales y se definen por el flujo neto de calor que incide sobre la unidad de superficie expuesta al fuego de dichos elementos. La resistencia última de la estructura, tras la que sobreviene el colapso de la misma, depende de la resistencia esencial o intrínseca del material (Bilodeau, Kodur y Hoff 2004).

En términos de pérdida de resistencia a compresión, podemos decir que depende de la temperatura alcanzada por el material, donde en torno a 400 °C es de un 15 % con respecto a una temperatura de 20 °C.

Un dato de suma importancia es el módulo de elasticidad del hormigón, que disminuye un 75 % cuando el material alcanza una temperatura de 400 °C con respecto a una temperatura de 20 °C, dato significativo, pues provocará mayores tensiones por retracción del material entre las fibras de la cara externa y expuesta al fuego en relación al interior de la masa, generando un elevado número de fisuras. Se podrá hacer un análisis general teniendo en cuenta la distribución de temperaturas, las propiedades del material, y las acciones en situación accidental. Para conocer la temperatura en el interior del hormigón se hace un análisis seccional mediante el método de la isoterma 500 o método de las zonas (figura 2.8).

Figura 2.8.- Gráfico de isotermas

Fuente: (CTE DB SI Seguridad en caso de incendio ANEJO C. Hormigón Armado, 2006)

Se pretende, en general y de modo resumido, que el centro de gravedad de la armadura de acero dispuesta se sitúe coincidiendo con la isoterma 500, posición interior a la sección de hormigón donde la temperatura máxima durante el incendio no supera los 500 °C y, por tanto, se puede contar con una capacidad de la sección resistente, durante el incendio, del orden del 70 % de la capacidad de dicha sección a 20 °C (figura 2.9). De este modo, se mantiene la estabilidad estructural durante el incendio, evitando el colapso de la misma y el derrumbamiento del edificio. Las líneas isotermas en el interior de una sección de hormigón estructural permiten demostrar que aproximadamente cada 20 mm de recubrimiento de hormigón la temperatura disminuye 150 °C con respecto a la superficie expuesta al fuego y en los siguientes 20 mm disminuye 250 °C.

Figura 2.9.- Método de la Isoterma 500

Fuente: Miquel Rodríguez Niedenführ-STATIC Ingeniería

Por otro lado, las estructuras porticadas de hormigón, debido a su carácter hiperestático, permiten una cierta redistribución de esfuerzos cuando alguna sección suficientemente dañada, plastifica. Esta redistribución colabora al mantenimiento de la situación de estabilidad estructural (figura 2.10).

Figura 2.10.- Incendio en edificios con estructura de hormigón

Fuente: https://4.bp.blogspot.com/-3bmruyTQ2LY/VhMDex0thkl/AAAAAAAAIzY/-QDLSxQihwg/s1600/1108297454_850215_0000000000_portadilla_normal.jpg

Se sabe pues, que el hormigón protege el acero de modo eficaz, continuo, permanente, sin la existencia de puntos débiles mal protegidos y es una protección que no envejece, no se deteriora y no necesita de un mantenimiento específico para que cumpla su función protectora.

La transmisión térmica, cuando la temperatura del fuego es superior a 100 °C, afecta de manera muy particular a los materiales como el cemento, el yeso y la cal. Estos materiales compuestos obtienen su consistencia, resistencia y rigidez por el fraguado con el agua, que viene a integrarse dentro de la configuración cristalográfica y molecular del compuesto (file:///f:/bibliografia%20articulos/biblio%20fibras%20y%20fuego/v-temaii.2.3.6.termicas.resistenciafuego.pdf).

Cuando estos materiales son sometidos a altas temperaturas, muy por encima de los 100 °C, se inicia en su interior un proceso opuesto al fraguado con la evaporación del agua contenida en los huecos y del agua molecular. Este proceso se denomina calcinación y, en él, al final, el hormigón deja de tener consistencia y toma un tono rojizo (Marimon 2007).

Este proceso es relativamente lento y el material trata de resistir la evaporación. La calcinación viene a ser un proceso relativamente lento por capas, donde cada una de estas capas estará a 100 °C mientras se evapora el agua de la misma y luego aumentará su temperatura hasta llegar a las armaduras que comienzan a sobrecalentarse.

La permeabilidad es el parámetro principal que influye en la degradación superficial del hormigón. El vapor de agua, proveniente de la evaporación del agua libre o combinada, fluye a través del sistema poroso hacia regiones con menor presión. Por una parte, se dirige hacia la superficie exterior y por otra penetra en el interior del hormigón.

En el caso de hormigón armado, la eliminación del hormigón superficial puede dejar la armadura expuesta directamente a las llamas y a las altas temperaturas, con las consecuencias que ello conlleva en la capacidad resistente del acero y, por tanto, de la estructura.

El incendio en su fase inicial produce la vaporización de la humedad constitutiva del hormigón, en lo que se consume una parte importante de la energía térmica, a la vez que tiene un proceso de deshidratación del hidróxido de calcio, lo cual en esta primera fase aumenta su resistencia mecánica hasta llegar a los 280 °C, punto a partir del cual decrece a medida que la temperatura en el interior va subiendo.

Con respecto a la disminución de la resistencia mecánica de un elemento estructural, influye la situación y forma de la pieza. Un soporte expuesto al fuego por las cuatro caras al estar trabajando a compresión pierde antes su

resistencia mecánica y las consecuencias son más graves que en una pieza trabajando a flexión. En el proceso de enfriamiento se produce la retracción del hormigón, lo que origina la aparición de grietas en el interior de la matriz, que en ocasiones no pueden ser detectadas de manera visual.

El hormigón tiene una conductividad térmica inferior a la del acero, por lo que es buen aislante para las armaduras o para las piezas embebidas. La resistencia al fuego de elementos de hormigón armado se basa en la reducción de resistencia del armado, al aumentar su temperatura. Hay que tener en cuenta que al calentarse la pieza, se ve afectada por una caída progresiva del hormigón de la superficie expuesta (desconchado), donde la variación de temperatura es alta, lo que deja a la armadura expuesta, a medida que el fuego progresa. En estos casos el hormigón pierde su función aislante y se reduce la resistencia de la pieza. El acero, como material con alta conductividad térmica, se calienta de modo inmediato, de forma tal que, expuesto directamente al incremento de temperaturas producido por el fuego, adquiere inmediatamente, y en toda su sección, la temperatura que se alcanza en el incendio. Al coger más temperatura, se dilata y se producen unas tensiones importantes en el perímetro de la barra (zona de unión del hormigón-acero) con la consiguiente fisuración del hormigón y la pérdida de adherencia entre ambos materiales.

Su comportamiento a temperaturas elevadas depende principalmente del tipo de árido. Así, el árido silíceo (grava, granito) tiende a desprenderse más fácilmente que el árido calcáreo (caliza). También se observa que el hormigón ligero posee mayores propiedades aislantes que el hormigón normal (Bilodeau, Kodur y Hoff 2004).

Con el aumento de la temperatura, se producen unos cambios de coloración en el hormigón, que sirven a la vez como indicadores de la pérdida de la resistencia mecánica. A 200 °C es gris y no hay pérdida apreciable de sus cualidades; de 300 °C a 600 °C se vuelve rosáceo, manteniéndose el hormigón aún en buenas condiciones; entre 600 °C y 900 °C cambia a color gris con partículas rojas que indican friabilidad, y por último de 900 °C a 1200 °C el hormigón se vuelve friable, cambia a color amarillo-ante y sufre la máxima pérdida de resistencia como se muestra en la figura 2.11 (Merchán 2000).

Figura 2.11.- Variación de resistencia y de coloración del hormigón con temperaturas elevadas
Fuente: *Elaboración propia*

Cómo se ha visto, el hormigón es un material que responde muy bien a los efectos del fuego, debida a una de sus características más relevante, que es su baja conductividad. Sin embargo, el acero posee un elevado coeficiente de conductividad térmica, lo que le convierte en un material con un comportamiento deficiente frente al fuego, pues puede incluso alcanzar elevadas temperaturas en zonas donde el hormigón se encuentra relativamente frío. En las estructuras de hormigón armado se combinan ambos materiales, lo que determina comportamientos absolutamente diferentes de ambos materiales frente al fuego. Debida a esta fuerte incompatibilidad del hormigón y el acero frente a la acción del fuego, la incorporación de un material que mejore las cualidades del hormigón cuando ambos actúan conjuntamente es una línea investigadora de sumo atractivo.

2.3.3.2.- Comportamiento mecánico y térmico del hormigón expuesto al fuego

Las propiedades mecánicas más importantes a tener en cuenta en el diseño de estructuras sometidas a la acción del fuego son la resistencia a compresión, a tracción, el módulo de elasticidad y la energía absorbida (Noumowe 2005).

El aumento de las temperaturas causa deformaciones y cambios en las propiedades de los materiales que conforman un elemento estructural. Para conocer las deformaciones y los cambios en las propiedades, existen métodos

usuales de la mecánica estructural que permiten predecir la resistencia al fuego de una estructura (Kodur, Wang, y Cheng 2004).

Actualmente el uso de métodos numéricos para el cálculo de la resistencia al fuego de los elementos estructurales está ganando aceptación, porque estos métodos de cálculo son mucho menos costosos y lentos (Lausanne y Switzerland 2007). El conocimiento de las propiedades del material ante una temperatura elevada, permite conocer mediante procedimientos matemáticos el comportamiento de las estructuras y predecir la resistencia al fuego de los elementos estructurales (Kodur, Dwaikat, y Raut 2009). La información genérica disponible sobre las propiedades del hormigón a temperatura ambiente, rara vez se aplica al diseño de la resistencia al fuego de los elementos estructurales (Kodur y Harmathy 2008).

La respuesta al fuego del hormigón armado está estrechamente relacionada con las características de los materiales que lo componen. Entre las propiedades más importantes del hormigón se encuentran las térmicas, mecánicas, de deformación y otras características específicas del material, como el astillamiento explosivo del hormigón, conocido como efecto “spalling”. Estas propiedades varían significativamente con la temperatura y también dependen de la composición y características del hormigón mezcla, así como la velocidad de calentamiento y otras condiciones ambientales. (Kacianauskas, Raftoyiannis y Hindawi 2014).

El proceso de variación de la temperatura en el hormigón es mucho más complejo que en el acero, debido a la migración de la humedad, así como a la variedad de compuestos que lo constituyen. Las propiedades térmicas determinan la transferencia de calor a la estructura, mientras que las propiedades mecánicas determinan la pérdida de resistencia y la disminución en la rigidez del elemento (Dwaikat y Kodur 2010). Las propiedades de deformación, en relación con las propiedades mecánicas, van a determinar el grado de deformación. Además, el desprendimiento del hormigón afectado por el fuego puede jugar un papel significativo en el rendimiento de las estructuras de hormigón armado (RC). Todas estas propiedades varían en función de la temperatura y dependen de la composición y características del hormigón, así como del acero de refuerzo (Kodur y Harmathy 2008).

La resistencia del hormigón disminuye con la temperatura, y el porcentaje de pérdida está estrechamente relacionado con la resistencia inicial del hormigón. Las propiedades térmicas que influyen en el aumento de la temperatura y cómo se distribuye en un elemento estructural de hormigón son la conductividad

térmica, el calor específico y la pérdida de masa entre otras (ASTM E1530 USA 2011).

La conductividad térmica es la propiedad de un material para conducir calor. En el hormigón armado, esta propiedad se ve muy influenciada por el contenido de humedad que contiene (Bazant y Kaplan 1996). Cuando hablamos de la conductividad térmica del hormigón convencional a temperatura ambiente, su valor oscila entre 1,4 y 3,6 W / m°C. Para medir la conductividad térmica se usa principalmente el método basado en la transmisión lineal del calor (Shin et al. 2002). La conductividad térmica del hormigón a temperatura ambiente disminuye gradualmente con la temperatura y esta disminución depende de los tipos de hormigón, más concretamente del contenido de humedad y de la permeabilidad. Esta tendencia decreciente en la conductividad térmica puede ser debida a la variación del contenido de humedad con el aumento de temperatura. La conductividad térmica de HSC es más alta que la de NSC debido a su menor relación a / c y al uso de diferentes aglutinantes en HSC (Kodur y Khaliq 2011).

En general, la conductividad térmica de HSC está en el rango entre 2,4 y 3,6 W / m°C a temperatura ambiente. La conductividad para hormigones reforzados con fibra de acero y fibras de polipropileno, siguen una tendencia similar al hormigón convencional y se encuentran más cerca de los HSC. Por lo tanto, se entiende que no hay un efecto significativo de las fibras en la conductividad térmica del hormigón en un rango de temperatura comprendido entre 20 °C - 800 °C

El calor específico es la cantidad de calor por unidad de masa requerida para cambiar la temperatura de un material en un grado y a menudo se expresa en términos de capacidad térmica (calor). El calor específico es altamente influenciado por el contenido de humedad, el tipo de árido y la densidad del hormigón y es usualmente medido mediante la calorimetría diferencial de barrido (DSC) (Kodur y Sultan 1998). El calor específico del hormigón varía en el rango de 840 J / kgK y 1800 J / kgK para diferentes tipos de hormigones. La propiedad del calor específico es sensible a varias transformaciones físicas y químicas que tienen lugar en el hormigón a temperaturas elevadas, como la vaporización de agua libre a aproximadamente 100 °C, la disociación de Ca(OH)_2 en CaO y H_2O entre 400 °C - 500 °C, y la transformación de cuarzo de algunos áridos por encima de 600 °C. El calor específico depende por lo tanto del contenido de humedad y aumenta considerablemente con una mayor relación de agua y cemento. El calor específico del hormigón permanece casi

constante hasta 400 °C, seguido por aumentos de hasta aproximadamente 700°C y luego permanece constante en el rango entre 700 °C y 800 °C. De los diversos factores que influyen, el tipo de árido tiene una influencia muy significativa en el calor específico (Tang y Lo 2009).

Las propiedades mecánicas que determinan el rendimiento frente al fuego de los elementos de hormigón estructural son la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la energía absorbida por los materiales al encontrarse sometidos a elevadas temperaturas, siendo más determinante en el diseño de las estructuras la resistencia a compresión.

La resistencia a la compresión del hormigón a temperatura ambiente depende de la relación agua-cemento, las condiciones de curado, el tipo y tamaño de los áridos, así como de la dosificación (Mehta y Monteiro 2006).

A altas temperaturas, la resistencia a la compresión está muy influenciada por la resistencia a temperatura ambiente del material, la velocidad de calentamiento y los aglutinantes de la mezcla (humo de sílice, ceniza volante y escoria). A diferencia de las propiedades térmicas, las propiedades mecánicas del hormigón están bien investigadas. La resistencia a tracción del hormigón es mucho menor que la resistencia a compresión, debido a la facilidad con que las grietas pueden propagarse bajo cargas de tracción (Mindess, Young y Darwin 2003).

El hormigón es débil en tracción, y para NSC, la resistencia a la tracción es solo del 10 % de su resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción de un HSC es aún más reducida. Por lo tanto, la resistencia a la tracción del hormigón no es determinante en los diseños de cálculo de resistencia cuando hablamos de hormigones sometidos a elevadas temperaturas. Sin embargo, es una propiedad importante, porque el agrietamiento en el hormigón generalmente se debe a tensiones de tracción y el daño estructural del elemento en tracción es a menudo generado por la progresión de la microfisuración. Bajo la influencia de un incendio, las condiciones de la resistencia a la tracción del hormigón pueden ser aún más cruciales en los casos en que se produce el astillamiento inducido por el fuego en un elemento estructural de hormigón (Khaliq y Kodur 2011).

Las propiedades a efectos de deformación de los elementos de hormigón armado son la expansión térmica y la fluencia del hormigón a temperaturas elevadas. La expansión térmica se caracteriza por la expansión (o contracción) de un material causado por calentamiento y se define como la variación de la

longitud de la unidad de un material cuando la temperatura del hormigón se eleva en un grado. La expansión se considera positiva cuando el material se alarga y se considera negativa (contracción) cuando acorta. En general, la expansión térmica de un material depende de la temperatura y se evalúa a través de la curva dilatométrica, que es un registro del cambio de la fracción de una dimensión lineal en un sólido a un ritmo cada vez mayor o menor según la temperatura. La expansión térmica es una propiedad importante para predecir las tensiones térmicas que se introducen en un elemento estructural bajo condiciones de fuego (Bazant y Chern 1987).

Para tensiones normales y temperatura ambiente, las deformaciones debido a la fluencia no son significativas. A niveles de tensión más altos y a temperaturas elevadas, sin embargo, la deformación causada por fluencia puede ser sustancial (Harmathy 1967).

Otra propiedad significativa en el comportamiento frente al fuego de un hormigón estructural, es el fenómeno de astillamiento explosivo mencionado con anterioridad (efecto spalling). El fenómeno spalling se define como el desprendimiento del hormigón por capas desde la superficie, cuando está expuesto a altas temperaturas de manera rápida, como las existentes en los incendios (Dwaikat y Kodur 2009).

La mayoría de los investigadores coinciden en que las principales causas de astillamiento del hormigón en los incendios son la baja permeabilidad y la migración de la humedad en el hormigón cuando se somete a temperaturas elevadas. Existen dos teorías respecto a la aparición del desprendimiento inducido por el fuego en el hormigón armado y también en su mecanismo. La acumulación de presión, ya que se cree que el astillamiento es causado por la acumulación de presión de poro durante el calentamiento y la dilatación térmica restringida, que genera tensiones de compresión paralelas a la superficie calentada, que son liberadas mediante la fractura frágil de hormigón (desprendimiento) (Kodur y Phan 2007).

El desprendimiento puede ocurrir poco después de la exposición a un rápido calentamiento y puede ir acompañada de explosiones violentas. En ocasiones, sucede durante las últimas etapas del incendio cuando el hormigón se ha vuelto débil después del calentamiento. Las consecuencias son limitadas, siempre que la extensión de los daños sea leve, pero el descascarillado extenso puede conducir a pérdida de estabilidad e integridad (Yu, Zha y Huang 2011). Además, el descascarillado expone las capas más profundas del hormigón a temperaturas de fuego, lo que aumenta la transmisión de calor a

las capas internas del elemento, incluido el refuerzo. Cuando el refuerzo está directamente expuesto al fuego, las temperaturas aumentan a un ritmo muy alto que conduce a una mayor pérdida de la capacidad del elemento estructural (Kodur y Dwaikat 2008). La pérdida de resistencia en el refuerzo, combinado con la pérdida de hormigón debido al desprendimiento, disminuye significativamente la resistencia al fuego de un elemento estructural (Harmathy 1971).

Aunque puede producirse desprendimiento en todos los tipos de hormigón, en los hormigones HSC es más susceptible el desprendimiento que en los NSC, debido a su baja permeabilidad y menor relación agua-cemento (Harmathy 1993). El desprendimiento provocado por el fuego depende aún más de una serie de factores, como son la permeabilidad de hormigón, el tipo de exposición al fuego y la resistencia a la tracción de hormigón (Khoury 2008; Kalifa, Chene y Galle 2001).

El fenómeno denominado “spalling” puede observarse en la figura 2.12, donde debido a las tracciones generadas en el hormigón aparece un estallido explosivo, que deja al descubierto las armaduras. La pérdida significativa de espesor del recubrimiento del hormigón, debida al efecto spalling o desprendimiento por explosión del hormigón, supone una disminución de la resistencia del hormigón cuando su temperatura supera los 380 °C durante períodos prolongados.

Figura 2.12.- Migración del vapor de agua a través de los capilares por aumento de la temperatura, produciéndose el fenómeno “spalling”

Fuente: <https://www.google.es/search?q=efecto+spalling>

Por otro lado, hay que mencionar el comportamiento de la densidad o masa del hormigón, ya que disminuye con el aumento de la temperatura debido a la pérdida de humedad. La permanencia de masa de hormigón a temperaturas elevadas está íntimamente relacionado con el tipo de árido. La pérdida de masa es mínima tanto para el carbonato como para áridos silíceos hasta alrededor de 600 °C. Sin embargo, el tipo de árido tiene una influencia importante en la pérdida de masa en hormigones por encima de 600 °C. En el caso del hormigón con árido silíceo, la pérdida de masa es insignificante incluso por encima de 600 °C. Sin embargo, por encima de 600 °C, el árido calizo tiene un mayor porcentaje de pérdida de masa en comparación al árido de hormigón silíceo. Este porcentaje más alto de la pérdida de masa en el hormigón con árido de carbonato, se atribuye a la disociación de la dolomita en el árido calizo alrededor de 600 °C (Li, Qian y Sun 2004).

La permeabilidad es uno de los parámetros más importantes para cuantificar la durabilidad en el hormigón de alto rendimiento. La permeabilidad está estrechamente relacionada con el fenómeno de desprendimiento en el hormigón sometido a temperaturas elevadas (Noumowe, Siddique y Debicki 2009).

A 300 °C, el hormigón pierde aproximadamente el 20% de su resistencia inicial a tracción. Por encima de 300 °C, la resistencia a tracción del NSC disminuye a un ritmo rápido debido a la formación de microfisuras, alcanzando aproximadamente unas pérdidas del 20% de su resistencia inicial al alcanzar los 600 °C. (Eamon y Jensen 2013). Cuando al hormigón se ve afectado por un incendio, experimenta pérdidas de resistencia a compresión del orden del 15 % cuando alcanza temperaturas de 400 °C, mientras que disminuye mínimamente su capacidad mecánica hasta los 280 °C (Doo et al. 2014). Además disminuye su módulo de elasticidad longitudinal en un 75% cuando se alcanzan temperaturas próximas a 400 °C, provocando un elevado número de fisuras (Bratina et al. 2005; Capua, Mari y Nonlinear 2007).

La pérdida de durabilidad del elemento se relaciona con la fisuración que provoca el aumento de temperatura. Se reducen los recubrimientos al evaporarse de forma brusca el agua contenida en los poros, lo que provoca unas tensiones importantes que originan el desprendimiento explosivo del hormigón (efecto spalling). Además, el hormigón sufre un proceso de

carbonatación que provoca un aumento de la profundidad del frente de carbonatado (Lura y Terrasi 2014).

Uno de los principales problemas del comportamiento de las estructuras ante el fuego, es la falta de estudios a escala real, llevándose a cabo investigaciones de todo tipo que permitan aproximarse lo máximo posible al comportamiento de una estructura de gran tamaño. Existe algún estudio de la acción de los incendios en las envolventes de túneles a escala real, donde se observa la influencia severa del incendio sobre la seguridad de las estructuras de apoyo, como varía el aumento de temperatura y las temperaturas máximas.

Algunas de las investigaciones recientes en las estructuras de hormigón reforzado con acero (SCR) sobre el rendimiento de resistencia al fuego y post-fuego de las estructuras típicas de hormigón, concluyen que las estructuras reforzadas se comportan de una manera dúctil durante la exposición y después de un incendio, y tienen un excelente rendimiento debido a esta "acción mixta" entre el acero y el hormigón que reviste de forma periférica toda la superficie del elemento estructural (Han, Tan y Song 2013).

Como hemos visto, son numeroso los ensayos sobre la acción del fuego en el hormigón a lo largo de años, incluso existen investigaciones que incorporan información y estudios en el campo de la simulación con programas de elementos finitos. Se intenta profundizar aún más en el campo de la temperatura con las simulaciones, y que la comparación entre los resultados experimentales y numéricos sea lo más acertado posible, tanto a nivel de pilares de hormigón armado como de vigas expuestas al fuego.

Por último, después de un fuego, hay que evaluar si una estructura sigue siendo segura, ya que a pesar de que no se aprecien signos de daños aparentes es muy posible que haya sufrido cambios, y por tanto, la distribución de las cargas se habrá modificado. Es importante prestar atención no sólo a la fase del incendio, sino a la situación post-incendio para conocer la seguridad del comportamiento de la estructura después del enfriamiento. Incluso si el fuego no parece haber generado daños aparentes, las propiedades mecánicas de los materiales y la distribución de cargas pueden haberse visto afectadas.

2.4.- Hormigón y grafeno, la interacción entre ellos

2.4.1. Comportamiento mecánico del hormigón con adiciones de carbono

Heukamp divide la microestructura de los materiales de base de cemento en tres niveles a medida que aumentamos la escala de estudio, donde el hormigón se encuentra desde 10^{-1} hasta 10^{-4} ocupando un tercer nivel (Josefulm, Lemarchand y Heukamp 2003). Cuando hablamos de nanoestructuras, el nanómetro es la unidad de longitud del Sistema Internacional de Unidades (SI) que equivale a una mil millonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) o a la millonésima parte de un milímetro. Cómo conseguir la perfecta interacción entre estructuras a diferentes escalas es uno de los propósitos mencionados.

Según se ha explicado en el capítulo 2.2, los avances en el campo de los nanomateriales ha permitido desarrollar nuevos materiales a partir del grafeno, existiendo variedades como las nanofibras de carbono (CNFs), los nanotubos de carbono (CNTs) y el óxido de grafeno (GO), entre otros, que proporcionan una dimensión extra para interactuar con el cemento y con el hormigón (Sasmal et al. 2017). El efecto de incorporar nanomateriales en dosis bajas al hormigón, permite mejoras en la hidratación del cemento, la microestructura del hormigón y una notable mejora de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de cemento (Lu et al. 2015).

Las nanoláminas de grafeno (GNS) y el grafito artificial (GP), demuestran a partir de resultados experimentales una importante capacidad de gestión térmica y un buen comportamiento como disipadores de calor. Pudiendo alcanzar mejoras de hasta un 26% de aumento en la conductividad térmica en comparación con otros materiales (Yeou, Chien y Rong-Jong 2015).

Continuando con las notables propiedades térmicas del grafeno, ciertos estudios realizados con óxido de grafeno (GO) muestran que el material posee una buena estabilidad química y una alta conductividad térmica y eléctrica, que lo hace idóneo para la fabricación y el uso en diferentes aplicaciones, sobre todo cuando se precisa una buena gestión térmica (Lv et al. 2013; Mohammed et al. 2015). El empleo de grafeno junto con el hormigón, permite conseguir mejoras en las propiedades del hormigón (Lv et al. 2014), aumentando la resistencia a tracción y a flexión, así como su durabilidad (Chuah et al. 2014; Ray 2015).

Estos fenómenos son debidos a que la incorporación de óxido de grafeno provoca una hidratación por adsorción tanto de las moléculas de agua como de

los componentes de cemento, que mejora el rendimiento del material (Chen et al. 2015; Lin, Wei y Hu 2016).

Desde el punto de vista de la capacidad mecánica, se ha demostrado que la mejora del comportamiento de los compuestos de cemento reforzados a tracción (SHCC) con adición de óxido de grafeno, son debidos a una mejora en la matriz de cemento así como al enlace químico entre el alcohol polivinílico y la matriz de cemento con adición de óxido de grafeno. De suma importancia, es considerar las cantidades añadidas, ya que un exceso de óxido de grafeno tendría un efecto perjudicial (Lu, Li y Leung 2016).

Centrándonos en las investigaciones llevadas a cabo con nanotubos de carbono (CNTs), se han obtenido resultados muy alentadores, donde con una adecuada dispersión de CNTs se produce un aumento de un 40% de la resistencia a compresión y un aumento moderado de la resistencia a tracción, a pesar de las altas deformaciones (Morsy, Alsayed y Aqel 2011). Estos resultados se obtienen con bajas concentraciones de CNTs de tipo alargado, pues son más efectivas que un alto volumen de CNTs de tipo corto (Sobolkina et al. 2012; Abu Al-Rub, Ashour y Tyson, 2012).

Respecto al comportamiento de las nanofibras de carbono (CNFs), existen algunas investigaciones en las que son añadidas en compuestos poliméricos, entre otras. No son numerosas las investigaciones realizadas en la combinación de CNFs con el hormigón. Algunos de los resultados encontrados muestran que la adición de CNFs a la pasta de cemento mejora la resistencia a flexión, la ductilidad, la tenacidad a la fractura y el control de las microfisuras, debido a su gran superficie específica (Metaxa, Konsta-Gdoutos y Shah 2013; Peyvandi et al. 2013). Otras investigaciones en esta línea, han demostrado que el empleo de bajas concentraciones de CNFs y de CNTs aumenta a edades tempranas la resistencia a compresión (Konsta-Gdoutos et al. 2017). Este aumento de la resistencia, depende en mayor medida de la cantidad de fibras que del grado de dispersión de las mismas. Cabe destacar, que la adición de CNTs al 0,1% en peso de cemento contribuyen a disminuir la velocidad de corrosión y aumentan significativamente su resistencia, retrasando el inicio de la corrosión (Tyson et al. 2011; Vera 2009).

Ciertos estudios inciden en el comportamiento donde el cemento se une con la superficie del árido (zona de transición interfacial), para comprender la resistencia y el comportamiento de la fisura del hormigón armado con nanofibra de carbono (CNF). Se demuestra que se puede mejorar en gran medida las

propiedades mecánicas de la zona de transición, lo que mejorará significativamente el módulo elástico del hormigón (Zhu et al. 2018).

Un aspecto muy atrayente en estas investigaciones, es la existencia de estructuras que demuestran la sensibilidad de estos compuestos de CNFs para detectar su propio daño, es decir, que se está estudiando la posibilidad de fabricar sensores de daños estructurales con CNFCC's, ya que las muestras con adición de CNFs muestran una buena capacidad de detección de deformaciones para períodos de curado de 28 días (Galao et al. 2014).

Los compuestos de polímeros a partir de espuma de grafeno, hojas de grafeno y polidimetilsiloxano flexible, crean una estructura interconectada que mejora la conductividad térmica, alcanzando valores aproximadamente 300% superiores cuando se incorpora una adición de grafeno del 0,7% en peso de cemento (Galao et al. 2014; Yun-Hong, Zhen-Kun y Shu-Lin 2016). Todos los resultados anteriores demuestran que el compuesto de espuma de grafeno y el polidimetilsiloxano flexible son buenos candidatos para la obtención de materiales con importancia de la gestión térmica como en el caso de los dispositivos electrónicos (Kunpeng et al. 2015).

EL hormigón auto-compactante reforzado con carbono reciclado y fibras de un polímero (CFRP), presenta una resistencia al impacto y una mejora considerable de las propiedades mecánicas (Mastali y Dalvand 2016). Por otro lado, el aumento de volumen de fibra de carbono reciclada y su longitud mejora las propiedades mecánicas y la resistencia al impacto pero reduce la trabajabilidad (Mastali, Dalvand y Sattarifard 2017).

Son muchos los parámetros estudiados en el comportamiento del hormigón cuando interactúa con las diferentes formas en las que encontramos el grafeno, encontrando incluso mejoras en la impermeabilidad al agua y a la entrada de cloruros (Du et al. 2016). Pero no todo en este descubrimiento es positivo, pues uno de los principales inconvenientes que presenta el empleo de estos nuevos materiales a nanoescala, es el elevado coste de producción de los mismos y el comportamiento frente a altas temperaturas en hormigones o morteros de cemento.

2.4.2.- Comportamiento frente al fuego del hormigón con adiciones de carbono

Cuando el fuego en el interior de un edificio incide de manera directa en los elementos estructurales durante un cierto tiempo y con intensidad elevada, causa lesiones de tipo grave, poniendo en entredicho su comportamiento mecánico tras la aparición de signos y síntomas debido a la agresión térmica.

En los últimos años, la tendencia a construir edificios de estructura de hormigón supone aproximadamente el 70% de las edificaciones existente, por ello la probabilidad de que ocurra un incendio que afecte a una estructura de hormigón es mayor que en otro tipo de estructuras. Por tanto, se considera necesario seguir conociendo e investigando en profundidad la capacidad resistente de este material cuando se le incorporan materiales novedosos que revierten en una mejora de la seguridad estructural frente al agente causante del fuego.

El aumento de temperatura en la superficie del elemento de hormigón compromete la resistencia mecánica a partir de 200 °C, dejando mayor paso de temperatura al interior de la matriz. Por tanto, buscar un refuerzo del hormigón mediante la incorporación de nanofibras de carbono con la intención de mejorar el comportamiento mecánico después de la agresión térmica es una semilla de estudio de investigación sin discusión.

Dada la importancia del grafeno, existen cada vez más investigaciones que lo utilizan como adición en otros materiales, pero no existen prácticamente investigaciones cuando hablamos del comportamiento de compuestos de cemento con adición de nanomateriales sometidos a altas temperaturas y cuando se encuentran sometidos a una exposición a fuego a escala real.

A continuación vemos como existen algunos ensayos a altas temperaturas, pero no a una exposición a un fuego propiamente. La utilización de nanotubos de carbono (CNTs) en estructuras de hormigón sometidas a altas temperaturas es conocido para la recuperación de la resistencia a flexión de vigas (RC) dañadas por el calor y reparadas con compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono (CFRP), donde se demostró que la adición de CNTs aumentó la capacidad de los materiales compuestos para recuperar la capacidad de carga a flexión y la rigidez de las vigas dañadas por el calor (Irshidat y Al-Saleh 2017).

Por ello, aunque existen estudios relacionados con la mejora frente al fuego del propio grafeno, no se existen ensayos de cómo se comporta el hormigón frente

al fuego cuando incorpora nanofibras de carbono en los porcentajes estudiados en esta investigación. Por ello, es aquí donde nace la posibilidad de rellenar ese nicho vacío de información, y avanzar en esta línea de investigación científica para llenarlo de contenido.

2.5.- Las estructuras de hormigón con adición de fibras

2.5.1.- Características de las fibras

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas. De una manera general, se pueden clasificar como fibras estructurales, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa, o como fibras no estructurales, a aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros. Las características geométricas de las fibras son: longitud (l_f), diámetro equivalente (d_f) y esbeltez (λ). Por otro lado, de acuerdo con su naturaleza, las fibras se clasifican en: fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas. La efectividad de las fibras puede valorarse por medio de la energía de rotura, expresada en Julios (J) (UNE-EN 14889-2:2008).

Las fibras pueden distribuirse por la matriz de cemento de varias maneras, depende de que sean fibras discontinuas o continuas. Las fibras de tipo discontinuo, se dispersan dentro de la matriz de manera casual y tendiendo a la tridimensionalidad, a diferencia de las continuas, que requieren una orientación prefijada. La forma y el aspecto se ha generalizado, siendo importante la relación existente entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente (l_f/d_e) (Romualdi y Mandel 1964).

La forma tiende a lo circular normalmente, aunque en algunas fibras, como las de polímeros, son planas, siendo dicho diámetro o la superficie, un parámetro básico para la adherencia entre la fibra y la matriz, además de la propia naturaleza de la fibra.

Las características físico-mecánicas son fundamentales, existiendo diámetros no estables, incluso presentando variaciones altas para un mismo tipo de fibras. Las densidades están acordes al tipo de material y la resistencia a la tracción es casi igual para todas las fibras, observándose los valores mayores en las inorgánicas.

El denominado coeficiente de calidad (resistencia a tracción/densidad aparente) trata de uniformar la eficiencia de las fibras. Desde este punto de vista, las más eficientes son las fibras de carbono, vidrio y poliésteres.

Al aparecer la fisura en la matriz cementicia, la fibra la intercepta y aparece el comportamiento postfisura, tratándose del papel fundamental otorgado a las fibras. Las fibras se distribuyen uniformemente por todo el hormigón, consiguiendo actuar en las grietas que se formen e impidiendo que crezcan (Bednár et al. 2013).

Otros autores sostienen, que después de aparecer la primera fisura el material reforzado puede soportar un nuevo aumento de los esfuerzos unitarios y por tanto posee un buen comportamiento postfisura. Cuando se trata de fibras discontinuas, la orientación coincidente en las direcciones de los esfuerzos de tracción no es válido, pues sólo una pequeña porción de las fibras coincidirá en esta dirección. Se recomienda que debe tomarse una longitud de fibra que no sea superior a un tercio de la menor dimensión del elemento a construir.(file:///f:/bibliografia%20articulos/bibliografia%20fibras/v-utilizacion_fibras_en_hormigones.pdf).

Eficiencia de las fibras (S) se define como la distancia entre los centros de gravedad de las fibras. Los autores de este concepto demostraron que la resistencia a la tracción en el instante en que aparece la primera fisura para un determinado volumen de fibras es inversamente proporcional con el intervalo geométrico existente entre las fibras. Por tanto estamos ante un criterio definitorio para determinar la resistencia al aparecer la primera fisura, obteniéndose que tomando como referencia la distribución cuadrada, el intervalo entre las fibras de distribución triangular es un 7% superior y el de la hexagonal un 12% inferior según Krenchel en 1975.

Para establecer la eficiencia de las fibras hay que profundizar en la distribución de los esfuerzos unitarios de adherencia y en la presencia de la fisura así como en el modo de rotura. Se introduce entonces la eficiencia de la adherencia a través de los coeficientes: influencia en la longitud de la fibra y la influencia del diametro de la fibra (Swamy 1973). Otros investigadores como Mckee, han expresado sus criterios acerca del intervalo geométrico de las fibras y han considerado que las fibras son distribuidas uniformemente en el espacio por lo que S es igual en todas las direcciones.

Cuando se adicionan fibras para reforzar el hormigón, se modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción,

impidiendo la abertura y propagación de fisuras (figura 2.13). Las fibras pueden tener una función estructural u otras funciones dentro de la matriz del hormigón, confiriéndole ductilidad, aumento de la anchura de las bielas de compresión, etc. Por consiguiente, la combinación de armadura convencional y fibras puede suponer una alternativa para reducir la cuantía de armadura convencional en regiones donde se presente una alta densidad de armadura que dificulte el correcto hormigonado del elemento. Por otro lado el fenómeno de plastificación no da lugar a problemas de inestabilidad en las zonas comprimidas de la sección de hormigón, con lo cual la plastificación de las fibras mejoraría el comportamiento del hormigón en estas zonas evitando su fisuración (UNE-EN 14889-1:2008).

Figura 2.13.- Elementos de hormigón con adición de fibras

Fuente: <http://www.solucionesespeciales.net/Index/Noticias/05Noticias/374954-Los-cuatro-tipos-de-hormigon-reforzado-con-fibras.aspx>

Pero cuando se habla del empleo de fibras en hormigón, no todo es positivo, ya que puede aparecer una pérdida de docilidad, cuya magnitud será función del tipo y longitud de la fibra empleada así como de la cuantía de fibras dispuesta. Este factor debe considerarse especialmente al solicitar la consistencia del hormigón en el caso de adición de fibras en obra. En el caso de hormigones con fibras, se recomienda que la consistencia del hormigón no sea inferior a 9 cm de asiento en el cono de Abrams. Por otro lado, estudios realizados han concluido que en sollicitaciones de compresión, se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón.

2.5.2.- Evolución histórica de las fibras

Las fibras no son un material nuevo o de reciente uso en la construcción, se sabe que se usan desde la antigüedad, y que se empleaban fibras como adición a un material para mejorar sus propiedades. Muchos son los ejemplos que dejan vestigios del uso de fibras, como los adobes de barro cocidos al sol, armados con paja y otros materiales naturales. Desde épocas ancestrales el hombre usó fibras para conseguir abrigo, construyendo sus casas de pajas, con el empleo de diferentes materiales orgánicos que tomó de la naturaleza, incluyendo la madera, por lo tanto ha estado familiarizado con el uso de fibras. Estos materiales propios de una construcción rudimentaria han evolucionado hasta la invención de las fibras sintéticas actuales, y así, a principios del pasado siglo las retoma, pero esta vez para mejorar propiedades básicas de los hormigones.

En la segunda mitad del siglo XX aparecieron importantes investigaciones donde publicaron libros dedicados exclusivamente a los hormigones reforzados con fibras como el de Hannant en 1978 y Ramachandran en 1981 entre otros.

La fibra de acero fue empleada para reforzar los hormigones en torno a 1960. Fue un tipo de fibra pionera en este sentido, usando fibras de diferentes tipos. Para mejorar la adherencia entre el hormigón y las fibras incorporadas se usaban fibras trenzadas, con extremos conformados e incluso se añadía humo de sílice.

En España, los refuerzos de hormigones con fibras de acero se empezaron a utilizar de manera usual alrededor de los años 70 y se creó un Comité Técnico de Normalización CTN-83 encargado de regular la utilización de las fibras de acero y las fibras de polipropileno. En 2008, se publicó la EHE-08 que rige la normativa sobre los hormigones reforzados con fibras de acero.

El empleo de fibras pretende enfatizar en la búsqueda de soluciones para mejorar la calidad del hormigón, a partir de sus satisfactorias propiedades mecánicas y su homogeneidad.

Estados Unidos fue uno de los primeros países que comenzó en la primera década del siglo XX con el estudio de las características físico-mecánicas del hormigón, introduciendo “clavos picados” y pedazos de piezas metálicas. Cabe destacar los estudios realizados por Porter en 1910 y por Graham en 1911, quien propuso la utilización de fibras de acero para mejorar en el hormigón la resistencia y la estabilidad. La primera patente (William Ficklin 1914), en

Estados Unidos, inventó un hormigón resistente a la fisuración y al desgaste, a partir de virutas metálicas.

La primera gran obra donde se usan fibras de acero se atribuye al Arquitecto e Ingeniero Pier Luigi Nervi, llamado el padre del ferrocemento, cuando construye la cúpula del Palacio de los Deportes de Roma en 1959 (figura 2.14)

Figura 2.14.- Palacio de los Deportes de Roma

Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/palacete-del-deporte/>

Pero realmente la verdadera investigación científica de las fibras mezcladas con el hormigón comienza en la década de los 60, con los estudios llevados a cabo por James Romualdi en Estados Unidos. Sucede, de manera interesante, una diversificación mundial de estudiar las fibras en su interacción con los hormigones. Se validan las ventajas relativas de cada fibra y se despierta el que hacer de muchos científicos como el inglés Swamy y el sueco Gram.

El American Concrete Institute (ACI) en Estados Unidos crea el Comité 544 para el estudio, análisis y seguimiento de los hormigones fibrorreforzados (FRC) y el Comité 549 para el Ferrocemento. En Europa aparecen grupos de estudios, a principios de los pasados años 90 para el análisis del comportamiento estructural en conglomerados cementicios fibrorreforzados.

Las convenciones celebradas en diferentes países del mundo analizan los resultados presentados por hormigones con fibras sintéticas, fibras de vidrio, fibras de acero, etc. Cualquier tipo de fibra le proporciona a los hormigones y morteros un refuerzo tridimensional que implica mejoras en las propiedades del elemento resultante. Las propiedades fundamentales que mejoran están asociadas a la resistencia a la tracción así como la eliminación, casi total, de la fisuración y se busca la diferencia que existe al usar las fibras de metal con las

de material sintético o las naturales, estudiando el tipo de fibra, su naturaleza, y se pretende tratar de lograr criterios uniformes.

Existen diversas clasificaciones para las fibras, considerando la más estándar las que las divide en naturales y las fabricadas por el hombre. La celulosa, se estudia y emplea dentro de morteros fundamentalmente, así como, las fibras polivinílicas, que han pasado a ser las más satisfactoriamente empleadas en el medio cementicio a nivel de durabilidad, principalmente el polipropileno (Akers y Studinka 1989).

Considerando las fibras naturales tenemos muy diversos tipos, tales como las de origen animal que se han empleado poco, sólo las de pelo de caballo a principios del siglo XIX en Estados Unidos y los resultados no fueron satisfactorios. Sin embargo, las de origen mineral son ampliamente difundidas, siendo las de asbesto las de más uso en la diversidad de productos que se agrupan en la llamada línea de los asbestos-cementos y entre ellas están las tejas, planchas lisas, tanques y tuberías, aunque a nivel mundial se pretende lograr la sustitución parcial o total de asbestos por ser perjudicial para la salud, al relacionarse con una acción carcinogénica tanto para el ser humano como para los animales.

Las primeras fibras de vidrio presentaron una importante degradación ante el ataque alcalino, y se produjeron a finales de los años 60 en Gran Bretaña. Las fibras de vidrio son un recurso no renovable y de alto costo de fabricación. Las fibras de acero son probablemente las primeras en ser utilizadas, muy difundidas, de probada eficacia, fundamentalmente en los Estados Unidos y países del primer mundo. Requieren de una alta tecnología de la industria sideromecánica para ser producidas. Acaparan un alto por ciento de las investigaciones realizadas a los hormigones fibrorreforzados en su historia. Su mayor desventaja está en su interacción con la matriz cemento-acero.

En cuanto a las de origen vegetal, principalmente se trabaja con fibras de la corteza o de hojas como son las de sisal, yute, caña, coco y otras. Existen muchos temores en su empleo, dejando casi la exclusividad de construir con las mismas a los países pobres, sin profundas investigaciones científicas, dada su alta degradación en el medio cementicio. Si no se degradaran, se trata de un tipo de fibra que presenta unas buenas propiedades mecánicas y el costo de fabricación es económico (Agopyan 1986).

2.5.3.- Comportamiento del hormigón con fibras

El hormigón en masa es un material frágil, con una resistencia a la tracción baja, y el incorporar fibras discontinuas, es tender un puente a través de las grietas que se desarrollen, aportando "ductilidad" (post-cracking). Si las fibras son suficientemente fuertes, unirán el material, y permitirán que el hormigón reforzado con fibras soporte tensiones significativas a través de una relativa capacidad de deformación en la etapa posterior a la formación de fisuras (Haselwander, Jonas y Riech 1995).

Está bien establecido que una de las propiedades importantes de la fibra de acero en el hormigón armado (SFRC), es su mayor resistencia a la rotura y propagación de grietas. Como resultado de esta capacidad de detener fisuras, materiales compuestos de fibra incrementan la deformación y la resistencia a tracción, tanto en la primera fisura como al final del proceso, en función de la carga. Las fibras son capaces de mantener la matriz de hormigón y fibras juntos, incluso después de rotura del elemento (Tailhan, Rossi y Daviau-Desnoyers 2015).

La contribución real de las fibras es que aumentan la tenacidad del hormigón. Las fibras tienden a aumentar la tensión con carga máxima, y proporcionan una gran cantidad de absorción de energía en la parte posterior al pico de la curva de carga frente a la flexión. El hormigón pretensado y reforzado con fibras, da como resultado un material de altas prestaciones en cuanto a su tenacidad, ductilidad y resistencia a la tracción. Mejora incluso, las características de agrietamiento y de deformación de los elementos estructurales del hormigón causados por solicitaciones sísmicas.

El comportamiento mecánico de un hormigón pretensado y reforzado con fibras de acero y de poliamida, muestran resultados alentadores en su capacidad de resistir las grandes fuerzas de inercia causadas por las solicitaciones sísmicas. La variación de respuesta del hormigón con el tiempo mejora las actuaciones estructurales y funcionales de las estructuras de hormigón relacionadas a las acciones sísmicas, siendo las fibras de acero más eficaces para evitar las fisuras que las fibras de poliamida (Carbel 2016).

Cuando hablamos de fisuración, nos referimos a la formación de grietas y se trata de uno de los mecanismos más interesantes dentro de los materiales compuestos. Cuando en los hormigones y morteros fibrorreforzados se consigue una menor propagación de la grieta al interceptar la fibra la fisura, se muestra que la elasticidad de un elemento de hormigón reforzado, aumenta en

proporción a la subdivisión y distribución del material de refuerzo a través de la masa. Por tanto, cobran singular importancia los materiales compuestos con fibras cuya orientación sea casual tendiendo a la tridimensionalidad, lo que convierte al material en más homogéneo que los hormigones armados tradicionales (Nervi 1954).

En el momento del agrietamiento el esfuerzo ante la primera grieta puede obtenerse utilizando la fórmula empírica de Naaman debido a que es una función de la superficie específica del refuerzo e independiente de la orientación del mismo. Romualdi y Mandel demostraron que el esfuerzo de agrietamiento es inversamente proporcional a la separación entre las fibras para cualquier fracción de volumen de refuerzo (Romualdi y Mendel 1964).

La influencia de la fibra, hace que el hormigón fibrorreforzado resista bien las altas flexiones, en el que se encuentran muy bien definidas las zonas que están traccionadas y las que están comprimidas.

El análisis del comportamiento a cortante del hormigón fibrorreforzado es objeto de amplios estudios, la causa es la dificultad que conlleva la individualización total de lo que aporta la influencia de la fibra a la acción cortante. Los parámetros fundamentales que influyen en el cortante son el tipo de fibra discontinua, fracción de volumen, relación área-diámetro y eficiencia. El comportamiento a cortante de los hormigones fibrorreforzados adquiere verdadera importancia cuando no existe armadura transversal de acero y al producirse la fisuración. Su análisis se basa en el equilibrio de fuerzas en un elemento fisurado en ausencia de armadura transversal de acero. La inclusión de partículas compuestos de fibra de vidrio mejora la resistencia al cizallamiento (Teodoro et al. 2017).

La tenacidad es una importante característica de los hormigones fibrorreforzados y se define como la energía total absorbida antes del colapso del elemento, representándose en la práctica como el área bajo la curva del diagrama tensión-deformación. En un material ordinario la tenacidad está muy ligada a la propagación de la fisura. En presencia de fibras, éstas interceptan a las fisuras en su proceso de formación, no dejan que se propaguen y hay una considerable posibilidad de aumento de la energía antes del colapso, por tanto una posibilidad real de aumentar la tenacidad. El aumento de la tenacidad está íntimamente influenciado por parámetros de orientación, contenido y forma de las fibras (Hormigones con Fibras. Determinación de la Resistencia a la Primera Fisura, Tenacidad e Índice de Tenacidad a Flexo-Tracción, Norma Española, España, 1987).

La ductilidad es un parámetro muy interesante cuando se habla de la incorporación de fibras en el hormigón, pues modifica su comportamiento, principalmente en tracción, evitando la abertura y propagación de fisuras, y aumentado su ductilidad considerablemente (Nguyen et al. 2014).

Cuando hablamos de la resistencia a la fatiga, se ha comprobado que un material fibrorreforzado aumenta su resistencia a la fatiga al crecer el volumen de fibras (Fike y Kodur 2011). Podemos considerar entonces que el conocimiento de las propiedades mecánicas de los hormigones fibrorreforzados es importante, máxime cuando trae aparejado mejoras a las características resistentes de los hormigones. En este ámbito, numerosas investigaciones han demostrado que la incorporación de fibras metálicas o de polipropileno produce un aumento de la resistencia y una disminución de la fisuración cuando el hormigón se encuentra sometido a altas temperaturas (Kim, Lee y Moon 2015; Al Qadi y Al-Zaidyeen 2014).

En la actualidad el hormigón auto-compactante en la construcción es un material que presenta muchas ventajas, entre las que destaca su alta resistencia a compresión. La incorporación de fibras en este material ha ido implantándose en el mercado ya que gracias a sus características ayudan a abaratar los costos de ejecución y a una sustitución parcial o total de la armadura, optimizando el hormigón convencional (Vega 2016).

Entre tantas y diversas aplicaciones en las que se usa el hormigón, un papel fundamental es reducir la pérdida de filtración del agua en el hormigón destinado en la construcción de obras públicas hidráulicas. Cuando aumenta la tasa de agrietamiento en el revestimiento del hormigón las pérdidas de agua son mayores, por ello, el agrietamiento en el revestimiento del hormigón puede ser reducido al mejorar la flexión, la compresión y la resistencia a la rotura por tracción del hormigón. El uso de fibras sintéticas mejora el refuerzo del hormigón, por su alta resistencia, menor absorción de agua y baja densidad. Las mezclas de hormigones agregando fibras con una longitud de 50 mm y una cantidad del 5 % en peso de cemento, demostraron que se reducen las resistencias a compresión, pero mejoran las resistencias de rotura a tracción y flexión, y se reduce la absorción de agua y contracción con respecto al hormigón tradicional, mejorando finalmente su rendimiento (Asad y Majid 2017).

2.6.- Las estructuras de hormigón con adición de fibras de acero

Indicar las propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras de acero o de las propias fibras de acero no es tarea fácil, pues hay que hablar de marcas y fabricantes, longitudes y diámetros, volumen de fibras y modo de fabricación.

Entre las características de las fibras de acero se pueden destacar los siguientes límites dimensionales:

- Las fibras redondas tienen entre 0,20 y 0,80 mm de diámetro, con largos variables en un rango entre 5 y 50 mm.
- Las fibras planas entre 0,15 y 0,40 mm de grosor y longitudes que van de 0,25 a 0,90 mm.

Las fibras de acero pueden ser redondas, planas o de forma especial. Las redondas se obtienen de los filamentos de acero en el proceso productivo y las planas y las de formas especiales, a partir de métodos no convencionales que han sido patentados como los desarrollados por la Battelle Development Corporation, de Estados Unidos.

Al considerar las fibras de acero para las diferentes aplicaciones prácticas existen cuatro factores que deben ser considerados en el diseño:

- Longitud de las fibras (l_f). Las de mejores condiciones para proveer la adecuada ductilidad y energía de absorción son las de 25 mm a 50 mm.
- Volumen adecuado de fibras de acero y del resto de los materiales que componen el hormigón fibrorreforzado.
- Fabricación adecuada del hormigón fibrorreforzado.
- Protección a la corrosión. Aunque cuando se plantea que la corrosión de las fibras de acero no es un problema real, en determinados ambientes, es necesario considerarla. Se producen fibras especiales con este propósito, incorporándolas de acero inoxidable y de aleaciones de níquel-cromo.

Estas fibras, según el proceso de fabricación, se clasifican en: trefiladas (Tipo I), cortadas en láminas (Tipo II), extraídas por raspado en caliente (virutas de acero) (Tipo III) u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas) (Tipo IV) (UNE-EN 14889-1:2008).

La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón y puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc.

La longitud de la fibra se recomienda que sea, como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Además, el diámetro de la tubería de bombeo del hormigón exige que la longitud de la fibra sea inferior a $2/3$ del diámetro del tubo. Sin embargo, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad. A igualdad de longitud, fibras de pequeño diámetro aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado o red de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo una mejor redistribución de la carga o de las tensiones.

Un criterio para elegir la longitud de las fibras, es que la relación geométrica largo/diámetro esté comprendida entre 30 y 200. El reforzar hormigones con fibras lisas y rectas de acero trae aparejado que sólo hay disponible una pequeña longitud de empotramiento. El esfuerzo máximo viene dado por la capacidad de adherencia entre las fibras y la matriz a lo largo de la superficie de contacto. La posible corrosión de las fibras de acero que aparece en el hormigón puede suponer un problema, por ello, las fibras son tratadas con la correcta colocación del hormigón en la obra, pudiendo minimizar el peligro de formación de óxidos, que en todo caso sería superficial en la fibra.

Es relevante considerar los cambios fundamentales que poseen los hormigones reforzados con fibras de acero. La aplicación de las fibras de acero a los hormigones depende de la capacidad de los proyectistas para darle un empleo adecuado en función de la problemática planteada.

Existe un aumento de la resistencia a la tracción directa que varía con el volumen de fibras, de modo, que con el 2% de fibras de acero medidas en volumen, el incremento de la resistencia a tracción es del orden del 25 % aproximadamente. El aumento del límite elástico y resistencia a la formación de fisuras aumenta en un 15% añadiendo el 2% de fibras de acero en volumen. Existe también una mejora de la resistencia dinámica entre 5 y 10 veces la resistencia del hormigón convencional. Cuando hablamos de la resistencia a la fatiga, existe una sustancial mejora en la ductilidad y en la absorción de energía antes de la rotura total (colapso). El hormigón reforzado con fibras de acero puede emplearse en multitud de infraestructuras como pavimentos, fundamentalmente losas de aeropuertos, pisos industriales, tableros de

puentes, losas sin vigas, estructuras a prueba de explosión en hormigones refractarios hasta temperaturas de 1600 °C, estructuras laminares de muelles e incluso en cascos de embarcaciones. Las fibras de acero son posibles de aplicar para usos a largo plazo, ya que, en general, son estables dentro de la matriz cementicia.

La primera obra de hormigón con fibras de acero tuvo lugar en marzo de 1974 en Fort Hood, Texas, Estados Unidos. Se colocaron 2.426 m³ de hormigón como pavimento en un espacio destinado al mantenimiento de tanques de combate y vehículos pesados. El espesor del pavimento fue de 100 a 130 mm, se adicionó fibras de acero en un 1,5 % del volumen de hormigón y se seleccionó una fibra redonda de diámetro comprendido entre 0,3 mm y 12,7mm de longitud. Este pavimento de “hormigón fibroso” se colocó sobre el original que era de hormigón asfáltico. La experiencia, en general, fue todo un éxito y abrió el camino para otras aplicaciones.

Las proporciones de la mezcla para hormigón reforzado con fibra de acero, dependen de los requisitos para cada trabajo en particular, en términos de resistencia, facilidad de trabajo, etc. En general, las mezclas de HRFA contienen mayores contenidos de cemento y una mayor proporción de finos respecto al árido grueso que los hormigones ordinarios, y los procedimientos de diseño de la mezcla que se le aplican al hormigón convencional, pueden no ser del todo aplicables a HRFA.

Cuando el refuerzo de fibra está en forma de fibras de tamaño corto, actúan eficazmente como inclusiones rígidas en la matriz de hormigón. El refuerzo de fibra de acero no puede considerarse como un reemplazo directo del refuerzo longitudinal en elementos estructurales de hormigón armado y pretensado. Por tanto, debido a las propiedades materiales inherentes del hormigón con fibras, la presencia de fibras en el cuerpo del hormigón mejora la resistencia al agrietamiento debido a la flexión y otras condiciones de servicio con respecto a elementos estructurales convencionales.

El tamaño de la fibra y la cantidad de la misma en el elemento de hormigón confiere mejoras en la absorción de energía de rotura. La absorción de la energía y la energía de fractura de la fibra de acero del hormigón armado (SFRC), así como la fuerza máxima y aumento de la absorción de energía total, depende de la cantidad de fibra. Por otra parte, una relación más alta de fibras tiene un efecto positivo sobre las características mencionadas, sin embargo revela valores de la energía de fractura y resistencia a la tracción más bajos cuando se trata de muestras a gran escala (Kim, Lee y Moon 2015).

El incorporar fibras de acero, se convierte en un complemento de los métodos existentes utilizados en construcciones de hormigón, aportando además características de confiabilidad y durabilidad. Esto hace que sea muy adecuado su empleo en elementos estructurales que necesiten soportar altas fuerzas dinámicas (impacto, vibración). Cabe destacar que su uso sólo puede resultar económico si se tienen en cuenta sus propiedades favorables en el diseño, pues el hormigón reforzado con fibras de acero es un material con elevado coste económico (Abrishambaf, Barros y Cunha 2015).

El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero presenta simultáneamente las ventajas de los hormigones autocompactantes y de los reforzados con fibras. Se consigue un material de altas prestaciones en cuanto a su colocación en obra, tenacidad y ductilidad. El comportamiento mecánico de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero a distintas edades, muestra la variación de la respuesta del hormigón con el tiempo, la diferencia existente con los hormigones tradicionales y la viabilidad del empleo de técnicas no destructivas para el control de hormigones con ensayos no destructivos (Sánchez et al. 2015).

El diseño y la construcción de estructuras de hormigón reforzado con fibra y prefabricados de revestimientos de túneles, muestran valores reales de la resistencia a la flexión residual a partir de ensayos experimentales de vigas de hormigón armado con fibra de acero con diversos tipos de hormigón (25, 35 y 45 MPa) y un volumen de adición de fibra del 0.25, 0.375 y 0.50 %. Las vigas de hormigón reforzado con fibra con una resistencia de 45 MPa muestran un aumento en la resistencia a la flexión residual inmediatamente después del agrietamiento del hormigón, cuando se adiciona un volumen de fibra de 0.5%. Por otro lado, a medida que se propaga la fisuración del hormigón, la resistencia a la flexión residual y la capacidad de absorción de energía disminuyen rápidamente para los hormigones con resistencia de 45 MPa (Jong-Han 2017). La resistencia del hormigón con fibras de acero en relación a la fisuración y la capacidad de absorción de energía una vez alcanzada la primera resistencia máxima a flexión, dependen estrechamente del contenido de fibra, variando sus resultados a partir de los porcentajes de fibra incorporados en el hormigón (Jong-Han, Baiksoon y Eunsoo 2017).

El empleo de fibras de acero también forma parte de la sostenibilidad de los materiales de construcción, y es sin duda alguna, una medida importante de perspectiva global de protección del medio ambiente. La pretensión en los tiempos que corren, es encontrar un nuevo ciclo de vida en los materiales si se

rediseñan bien, incluso en aplicaciones estructurales es de suma importancia. En este sentido, las fibras de acero obtenidas de neumáticos usados al final de su vida pueden encontrar aplicaciones prometedoras dentro de una matriz de hormigón, dando un comportamiento satisfactorio del hormigón reforzado con fibras de acero reciclado (Leone et al. 2018).

El empleo de fibras de acero en el hormigón es tan amplio, que incluso existen modelos de fisuración muy interesantes, basados en el análisis probabilístico para hormigones reforzados con fibra de acero (HRFA). La base física de estos modelos consiste en la creación de microgrietas. Con estos modelos se pretende simular el comportamiento de cizallamiento de vigas armadas con una mezcla reforzada con fibras de acero y establecer comparativas con la realidad. Los resultados experimentales y numéricos revelan valores muy positivos del comportamiento mecánico y del proceso de formación de grietas (Gaio et al. 2012).

2.7.- Las estructuras de hormigón con adición de fibras de polipropileno

Los primeros estudios con fibras de polipropileno se iniciaron en la mitad del siglo XX por la División de Desarrollo de la Armada de los Estados Unidos. El material sintético fue considerado el más apropiado para producir fibras en el uso con los hormigones. En 1982, Industrias Sintéticas, la segunda compañía productora y comercializadora de polipropileno, adquirió la patente de las fibras para hormigones, la desarrolló y la lanzaron al mercado como Fibermesh.

Actualmente las fibras sintéticas son usadas en todo el mundo, pues las fundamentales propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras sintéticas están estudiados por programas de ensayos basados en parámetros comparativos que producen una información útil para su aplicación. Son fibras químicamente inertes, no producen corrosión interna, tienen una gran resistencia a los ácidos minerales, álcalis y a las sales orgánicas, son estables y no absorben agua. De manera general las propiedades fundamentales que aportan al hormigón son, el control del agrietamiento inhibiendo el efecto resultante de tensiones internas provocadas por contracción y asentamiento plástico. Consiguen una mayor resistencia a la deformación y aumenta la resistencia al impacto.

Mediante las fibras se pueden alcanzar mayores resistencias a la fatiga, así como un aumento de la durabilidad y vida útil de las estructuras. Se reduce los problemas de corrosión del acero en medios agresivos en lugares donde no debe haber materiales metálicos como consecuencia de reducir la

permeabilidad. Aumenta notablemente la resistencia a compresión y a flexión, pudiéndose llegar a eliminar la malla electrosoldada. Destacado es el incremento de resistencia que experimenta a la abrasión y al desgaste. Desde el punto de vista de puesta en obra, reduce los tiempos de ejecución material, siendo seguro y fácil de usar.

Las fibras en el hormigón se pueden incorporar en planta o en la propia obra, fundamentalmente después de agregar los áridos, el cemento y el agua. La dosificación más usual es la de 900 gr/m³ de hormigón. La terminación es la misma que para un hormigón normal y en general la presencia de fibras en la superficie del hormigón no modifica el comportamiento, pudiendo eliminarse la fibra superficial con un proceso de flameado.

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, arámida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster, etc.) extrusionado y posteriormente cortado. Las fibras plásticas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruidos (Tipo I) y láminas fibriladas (Tipo II). Sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su forma. Atendiendo al tamaño encontramos micro-fibras: < 0,30 mm diámetro y macro-fibras: > 0,30 mm diámetro (UNE-EN 14889-2:2008).

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable desde 20 mm a 60 mm, y deben guardar relación con el tamaño máximo del árido. Las microfibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural (figura 2.15). También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado. Además de por sus características físico-químicas, las micro-fibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1 kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro (UNE-EN 14889-2:2008).

Figura 2.15.- Aspecto superficial y microscópico de hormigón con fibra de polipropileno
Fuente: <https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-reforzado-con-fibras/>

La fibra de polipropileno por sus características físicas y mecánicas puede reducir la permeabilidad y porosidad capilar por efecto de bloqueo de los poros en el hormigón, estas mejoras se consiguen con la cantidad óptima de polipropileno de $0,7 \text{ kg/m}^3$. Esta cantidad ideal, mejora la durabilidad del hormigón mediante la reducción de la velocidad de las ondas ultrasónicas, la penetración del agua y la capacidad de absorción. Por otro lado mejora la tracción y la resistencia a la flexión, a pesar de producir una reducción de la resistencia a la compresión (López Buendía et al. 2013). Cuando se lleva a cabo un tratamiento que modifica la química de la superficie y la topografía de la fibra de polipropileno, aparece una rugosidad adicional en la fibra y que conduce a un aumento en las propiedades de adhesión entre las fibras y el hormigón tratados, así como una mejora en la capacidad mecánica del hormigón reforzado con fibra tratada, en comparación con el hormigón que contiene fibras de polipropileno sin tratar (Ramezaniapour et al. 2013).

2.8.- Hormigón con hibridación de fibras

Es habitual intentar combinar fibras de diferentes materiales en tantos por ciento bajos o incluso diferentes tamaños del mismo material, con el fin de conseguir mejorar las características que ambos materiales confieren a la matriz de hormigón.

La hibridación con fibras de acero y de polipropileno conduce a mejoras tanto en las características mecánicas como en la ductilidad del hormigón. Resultados experimentales muestran una alta resistencia a la compresión, de aproximadamente 50 N/mm^2 con una mezcla hibridada de 0,9 % de fibras de acero y 0,1 % de fibras de polipropileno, presentando el mayor índice de mejora en la tenacidad y la resistencia residual (Yap et al. 2014).

Un hecho, entre muchos otros, que demuestra la importancia de la adición de fibras en los hormigones, es la respuesta tensional a estructuras sometidas a altas cargas en hormigones reforzados con fibras (UHPFRC) de diferentes tamaños y geometrías. Se consigue un aumento de la capacidad de deformación, de la capacidad de absorción de energía y del número de múltiples micro fisuras dentro de la unidad de longitud (Nguyen et al. 2014).

Por otro lado, la combinación de refuerzos de fibras de polipropileno y fibras metálicas, consiguen un confinamiento de las mismas con un efecto de malla (Yap et al. 2014).

Existen numerosas investigaciones con hibridación de fibras, con ánimo de buscar la proporción y característica ideal que optimice el comportamiento de cizallamiento y las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, flexión y tracción en un hormigón. En hormigones ligeros reforzados con fibra de acero (0,5%) y geopolímero de palma de aceite (1%) muestran mejoras en las propiedades mecánicas, especialmente en la resistencia a tracción, así como en la tenacidad a flexión. La resistencia al esfuerzo cortante mejora considerablemente con la hibridación de ambas fibras, por ello, se considera una hibridación interesante para la mejora del hormigón ligero (Hung et al. 2017).

Como material cerámico, los geopolímeros muestran un alto comportamiento cuasi-quebradizo y una energía de fractura relativamente baja. Para superarlo, la adición de fibras mejora la resistencia a flexión. El éxito de los refuerzos depende de la interacción entre la fibra-matriz. Los efectos de la incorporación de microfibras de acero (MSF) sobre las propiedades mecánicas del geopolímero basado en cenizas volantes con diferentes proporciones, repercute en el rendimiento de los esfuerzos a flexión y compresión. Se confirma que las adiciones de MSF mejoran significativamente tanto la capacidad de flexión máxima como la ductilidad del geopolímero basado en cenizas volantes, especialmente a edades tempranas, sin un efecto adverso sobre la resistencia a la compresión final (Ranjbar et al. 2016).

En vigas de hormigón sometidas al ensayo de rotura a flexión con adición híbrida de fibras de acero y polipropileno con contenidos volumétricos (0.5 % y 1.0 %), ya sea individualmente o en diferentes combinaciones, se observan beneficios potenciales en términos de rigidez, fuerza y ductilidad (Choumanidis et al. 2016).

2.9.- Hormigón con fibras sometido a altas temperaturas

Son muchos los ensayos prácticos que se han llevado a cabo sobre la incorporación de adiciones en el hormigón, para comprobar sus comportamientos al aumentar la temperatura y al efecto del fuego.

Al aumentar la cantidad de fibra metálica debería aumentar la conductividad, sin embargo, se encuentran investigaciones que demuestran que el aumento de la cantidad de fibra metálica aumenta la porosidad en el hormigón y no por ello aumenta necesariamente su conductividad térmica.

El efecto de la temperatura sobre las propiedades térmicas y mecánicas de un hormigón auto-consolidado (SCC) y un hormigón reforzado con fibra (FRSCC), muestran comportamientos destacados. El calor específico, la conductividad térmica y la expansión térmica, así como, las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, la tracción y el módulo elástico medidos en un rango de temperatura de 20 °C a 800 °C revelan resultados significativos. Las propiedades mecánicas muestran que la presencia de fibras de acero mejora la resistencia a la tracción y su módulo elástico a altas temperaturas en los hormigones auto-consolidados. Además, la expansión térmica del hormigón reforzado con fibra es ligeramente más alta que la expansión térmica en hormigones auto-consolidados en el rango de temperatura citado anteriormente. Los datos obtenidos a partir de estas pruebas, permiten desarrollar relaciones simplificadas para expresar las propiedades térmicas y mecánicas de estos hormigones en función de la temperatura (Khaliq y Kodur 2012).

La adición de una pequeña cantidad de fibras en las mezclas puede disminuir la porosidad total, pero el aumento del contenido de fibra da como resultado una mayor porosidad total. Las fibras añaden aire a la muestra, y aumentan la porosidad total, lo que produce una menor densidad y conductividad térmica. El aumento del volumen de fibra de acero no incrementa necesariamente la conductividad térmica de los hormigones reforzados con fibras, donde la conductividad térmica de los hormigones está directamente relacionada con la densidad e inversamente relacionada con la porosidad y el diámetro de los poros (Balázs et al. 2015).

La adición de fibras producirá una mejora considerable contra el fenómeno de spalling, siendo uno de los efectos más destacados en la bondad del material frente al efecto del fuego.

En este sentido, ensayos demuestran que tras someter a elementos de hormigón a un ensayo a fuego bajo distintos estados tensionales, la muestra sin fibras deja al descubierto la armadura convencional y, sin embargo, en la muestra con fibras de polipropileno aporta una clara disminución de la profundidad de las fisuras y un área menor de astillamiento del hormigón (spalling) (Ramezaniapour et al. 2013).

La adición de fibras de acero también colabora a reducir el fenómeno del spalling, dado que los microporos que existen alrededor de las fibras de acero permiten reducir la presión del vapor de agua en caso de incendio. Con la incorporación de las microfibras en el hormigón logramos evitar el fenómeno de spalling que ocurre en hormigón convencional. Las fibras, cuando alcanzan su temperatura de fusión, se descomponen sin producir gases nocivos y son absorbidas por la matriz que las envuelve. Así, se contribuye a la creación de espacios, que pueden ser entendidos como una red de canales conectados entre sí actuando como vías de escape, y por tanto, reduciendo la presión en los poros durante el incendio. Para prevenir el spalling es conveniente, por tanto, el uso de unas fibras tales que reduzcan su volumen al fundirse o evaporarse, y que además se descompongan a una temperatura inferior a la que se produce el fenómeno del spalling (aproximadamente entre 200 °C - 250 °C). A su vez, para controlar mejor el efecto spalling, se sugiere la existencia de mecanismos de alivio de presión que no sea sólo la fusión de las fibras (Kakooei et al. 2012).

El estudio del hormigón reforzado con fibras de acero de dos tipos (retorcidas o enganchados), con diferentes relaciones de diámetros-longitudes ($L / D = 60$ o 80) y con tres contenidos de fibra diferentes (0,25%, 0,5 %, o 1 %) sometido a rangos de temperaturas de 300 °C, 500 °C y 700 °C, demuestra que la resistencia residual a compresión es menor que la pérdida de resistencia a tracción (Kim, Lee y Moon 2015).

El hormigón reforzado con fibra de acero es un compuesto cementoso avanzado, donde las fibras pueden actuar como un reemplazo rentable para el refuerzo, actuando como una malla de acero soldada, especialmente en secciones estrechas. En este caso, el fuego se vuelve un parámetro muy importante en la condición de diseño. A través de una caracterización mecánica minuciosa de un SFRC después de ciclos térmicos a alta temperatura se comprueba un mejor comportamiento en cuanto a resistencia y fisuración (Colombo, di Prisco y Felicetti 2010).

Se conoce que la adición de polipropileno en el hormigón proporciona un mejor comportamiento del elemento a la acción del fuego. Son muchos los estudios que se han llevado a cabo para demostrar estas cualidades del polipropileno y veremos peculiaridades que definen pormenorizadamente este comportamiento.

Estas características nos conducen a las fibras plásticas, concretamente, se ha demostrado que las micro-fibras de polipropileno son las que ofrecen un mejor comportamiento en cuanto a la durabilidad frente al fuego. Las microfibras de polipropileno colaboran a reducir los efectos de los incendios. En este sentido, la cantidad de fibras a dosificar en el hormigón juega un papel importante. De hecho, la presión en los poros es inversamente proporcional a la cantidad de fibras, de modo que la presión disminuirá a medida que aumente la cantidad de fibras. El volumen de fibras debe ser tal que aumente la permeabilidad del hormigón creando una red interconectada de canales durante el incendio. Se propone un valor de 2 kg/m^3 como valor de referencia para que el hormigón tenga un comportamiento más durable frente a la acción del fuego. En la micro-estructura de cemento con fibras antes y después de la exposición a alta temperatura, se observa que el polipropileno fundido fluye sólo en las micro-fisuras y no penetra en la pasta de cemento a temperaturas que van desde 20°C a 300°C . La permeabilidad del hormigón con fibras presenta un aumento repentino a temperaturas comprendidas entre 80°C y 130°C (Al Qadi y Al-Zaidyeen 2014).

Existen datos de la respuesta del hormigón con fibras en con hidrocarburos, donde los desprendimientos del hormigón son importantes. La cantidad óptima de fibras de polipropileno que se utilizarán en peso es muy elevada para hormigones de alta resistencia, pues es la manera de evitar el desprendimiento del hormigón sometido a altas temperaturas (Uysal y Tanyildizi 2012). Otros resultados mostraron que existe una pérdida de resistencia severa de la resistencia a la compresión para todos los hormigones después de la exposición a 600°C , en particular de los hormigones que contienen fibras de polipropileno, a pesar de reducir y eliminar el riesgo del desprendimiento explosivo (Heo, Sanjayan y Han 2011).

El hormigón con fibras de polipropileno sometido a “choque térmico” de temperatura (200°C a 600°C), demuestra buenas propiedades mecánicas, mejorando la resistencia y la energía de fractura. Por otro lado, la forma geométrica de un elemento cilíndrico acusa mayores daños en la resistencia a

compresión frente a un elemento cúbico, debido a su fase de enfriamiento (Doo et al. 2014).

El hormigón de alto rendimiento es propenso al astillamiento explosivo (spalling) cuando se expone al fuego. La cantidad de fibras de PP necesita ser limitado con el fin de mantener las propiedades de auto-compactación, lo que puede reducir la resistencia del elemento estructural al fuego. Se incide también en reducir la exfoliación al efecto del fuego (maleabilidad) basado en la adición de pequeñas partículas de polímeros absorbentes durante el mezclado. Se originan macro-poros vacíos, similares a las burbujas de aire, en la matriz del hormigón. Este sistema permite el mantenimiento de las propiedades de auto-compactación al tiempo que reduce sustancialmente el desprendimiento del hormigón por el efecto del fuego. En particular, se muestra cómo la adición de polímeros súper absorbentes es capaz de reducir el desconchado por acción del fuego.

Con respecto al fenómeno del cizallamiento existente en el hormigón, señalar que la combinación del refuerzo de fibras de polipropileno y metálicas, demuestra un buen rendimiento frente al fuego (Yap et al. 2014).

Existen beneficios potenciales en términos de rigidez, fuerza y ductilidad, derivados del uso de diferentes fibras en vigas de hormigón cuando son expuestas a temperaturas de 280 °C. Cuando se agregan diferentes tipos de fibras de acero (0.5 %) y polipropileno (1.0 %), ya sea individualmente o en diferentes combinaciones y se realizan pruebas de flexión hasta la rotura, se observa mayor resistencia a la tracción y a la tenacidad, a temperaturas de 280 °C, pues el uso de fibras de acero parece proporcionar un comportamiento post-cracking óptimo (Choumanidis et al. 2016).

El hormigón de alta resistencia se ha usado en situaciones donde puede estar expuesto a temperaturas elevadas. Numerosos autores han demostrado la importante contribución de la fibra de polipropileno a la resistencia al descascarillado del hormigón de alta resistencia. Investigaciones arrojan algunos datos importantes sobre las propiedades mecánicas y la microestructura del hormigón de alta resistencia que incorpora fibra de polipropileno expuesta a temperaturas elevadas de hasta 200 °C. Cuando la fibra de polipropileno se calienta hasta 170 °C, las fibras se derriten y volatilizan fácilmente, creando porosidad adicional y pequeños canales en el hormigón, lo que produce pequeños cambios en la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y a tracción debidos a la fusión de la fibra de polipropileno (Noumowe 2005).

Ensayos a fuego de acuerdo con ISO-834 en hormigones de alta resistencia durante 3 horas de duración demuestran la mejora en la resistencia de los mismos, principalmente cuando se trata de hormigones con combinación de fibra de polipropileno y confinamiento de malla metálica (Young-Sun et al. 2011).

CAPÍTULO 3.- TRABAJO EXPERIMENTAL REALIZADO

3.1.- Introducción

Se realiza un trabajo experimental con probetas de hormigón estructural en masa incorporando adiciones. El trabajo es programado para hacer ensayos con varios tipos de probetas clasificadas en función del tipo de adición que se le incorpora, el tipo de ensayo a que se las somete y el porcentaje en peso de cemento de adición. Se establecen 6 tipos de probetas cilíndricas correspondientes a hormigones con fibras de acero, fibras de polipropileno, nanofibras de carbono (CNFs), hibridación de nanofibras de carbono con acero, hibridación de nanofibras de carbono con polipropileno y un grupo de hormigón sin adiciones de referencia como muestra patrón. Cada tipo de probetas es sometido a dos tipos de ensayo, un primer ensayo se lleva a cabo en el 50% de las probetas de cada tipo y se corresponde con el ensayo de resistencia a compresión. El segundo ensayo se realiza al otro 50% restante de probetas de cada tipo. Este segundo ensayo consiste en una prueba a fuego real con incidencia directa de las llamas emulando un incendio real. Tras este ensayo se somete también a estas probetas al ensayo a rotura por compresión. Con todos los resultados obtenidos, se establecen comparativas entre los diversos tipos de hormigones, principalmente con las probetas patrón sin adiciones como hormigón de referencia. Con el primer ensayo conoceremos como varía la resistencia a compresión de cada hormigón a partir de la adición incorporada. El segundo ensayo nos arroja datos del comportamiento de las probetas que tiene adición cuando se encuentran sometidas a una exposición directa al fuego para comprobar el efecto que provocan las altas temperaturas, y comparar los resultados de resistencia a compresión después de la agresión térmica.

Para evaluar la influencia de la conductividad térmica en el comportamiento del hormigón, se realizan 6 tipos de probetas cúbicas, a las que se adicionan nanofibras de carbono (CNFs), hibridación de CNFs y polipropileno, hibridación de CNFs y acero, fibras de polipropileno, fibras de acero y hormigones sin adición, en distintos porcentajes y sobre las que se realiza el ensayo correspondiente. Con este ensayo se pretende evaluar la influencia de la conductividad térmica del material en el comportamiento al fuego del hormigón con y sin adiciones.

Por último, con el fin de estudiar el comportamiento intrínseco del hormigón con y sin adiciones y ver como varía su composición química y textural en función de la temperatura, se realiza su estudio mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), con muestras en corte fresco y con muestras de lámina delgada.

3.2.- Materiales utilizados y proceso de elaboración

3.2.1.- Medios empleados

Para el desarrollo de la parte experimental de este trabajo se utilizan los siguientes medios pertenecientes al laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (ETSEM) de la Universidad politécnica de Madrid, el Servicio de Extinción de Incendios de la Comunidad de Madrid y el laboratorio de I+D+I de la empresa SIKA, S.A.U:

- Amasadora de hormigón planetaria de eje vertical con una capacidad máxima de 100l y capacidad de trabajo de 75 litros IBERTEST modelo CIB-701 actualizado a IB32-040V0.
- Báscula Balanco con esfera graduada de 0 a 100kg.
- Tamices metálicos UNE 7050.
- Moldes cilíndricos de acero (100 de diámetro y 200 mm de altura).
- Moldes cúbicos 150x150x150mm³
- Cámara de curado.
- Dispositivo de refrentado de 100 mm de diámetro y equipo para fundir azufre micronizado.
- Calentador de azufre Modelo: H-1000
- Prensa universal IBERTEST MIB-60/AM para ensayos de rotura a compresión y a tracción, con actualización de software Wintest 32 instalado en el ordenador para la obtención de resultados.
- Equipo de bandeja y parrilla de acero para ensayos a fuego directo.
- Termómetro infrarrojo compacto para la medición sin contacto de temperaturas de la superficie, testo 845.
- Cuarto de humos destinado a realizar fuegos reales bajo condiciones controladas.
- Equipo Decagon device (lector KD-2, sensor TR-1, varillas metálicas del tamaño de la sonda TR-1).

3.2.2.- Materiales empleados

- Áridos (Arenas y grava)

Los áridos empleados provienen de la planta de Allas (Adades-Segovia) que pertenece a la empresa ARIDOS SIRO (Avda. Vía Roma, 54 Segovia).

La grava es un árido grueso de fracción granulométrica 4-20 mm de naturaleza silíceo lavada. El tamaño máximo del árido grueso para el ensayo se estipula en 12 mm y cumple con la norma UNE-EN 12620 (AENOR 2009a). La arena utilizada es arena fina de río lavada de fracción granulométrica 0-6 mm de naturaleza silíceo lavada, según la Norma UNE-EN 13139 (AENOR 2004). Las características de los áridos pueden observarse en la tabla 3.1.

Grava		Arena	
Densidad	2,711g/cm ³	Equivalente de arena	≤ 75
Contaminantes orgánicos ligeros	≤ 0,50%	Densidad	2,549g/cm ³
Absorción de agua	≤ 0,50%	Materia orgánica	Exenta
Cl ⁻	≤ 0,001%	Absorción de agua	3%
Sulfatos solubles en ácido	Categoría AS _{0.2}	Cloruros	≤ 0,005%
Azufre total	≤ 0,02%	Partículas ligeras	≤ 0,50%
		Sulfatos solubles en ácido	≤ 0,80%
		Azufre total	≤ 0,11%

Tabla 3.1.- Características físicas y composición química de los áridos

- Cemento

El cemento utilizado cumple con la instrucción UNE EN 197-1:2011 (AENOR 2011) y RC-16 (Ministerio de Fomento 2016). Se utilizó el mismo tipo de cemento en todas las amasadas CEM II/BL 32,5. El cemento empleado pertenece a la Empresa Lafarge y sus características se muestran a continuación en la tabla 3.2.

Composición química		Características físicas	
Clínker (%)	65-79	Resistencia a compresión a 7 días (MPa)	≥ 16
Caliza (%)	21-35	Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	≥ 32,5 ≤ 52,5
SO ₃ (%)	≤ 3,50	Expansión Le Chatelier (mm)	≤ 10
Cl ⁻ (%)	≤ 0,10	Tiempo inicio de fraguado (min)	≥ 75
Cromo (VI) soluble en agua (ppm)	≤ 2	Tiempo final de fraguado (mm)	220

Tabla 3.2.- Características físicas y composición química del cemento empleado

- Adiciones

Se utilizan tres tipos de adiciones, nanofibras de carbono, fibras de acero y fibras poliméricas, cuyas características se detallan en la tabla 3.3 y pueden observarse en la figura 3.1.

- Nanofibras de carbono, en adelante (CNFs). Las nanofibras de carbono son un tipo de material sintético de carbono nano estructurado, de naturaleza similar al grafito.
- Fibras de Acero, en adelante (FA): Sika Fiber CHO65/35 NB. Alambre de acero trellado con dobleces en los extremos.
- Fibras de Polipropileno, en adelante (PP): Sika Sikafiber M-12. Monofilamentos de polipropileno para el refuerzo de hormigones y morteros. Cumple con la norma UNE 14889-2 (2008). Clase 1-a: "Microfibra Monofilamentosa".

Nanofibras de Carbono		Fibras de Acero		Fibras de Polipropileno	
Densidad (g/cm ³)	1,95	Densidad (g/cm ³)	7,85	Densidad (kg/l)	0,91
Área superficial (m ² /g)	45	Cantidad (unidades/kg)	15900	Cantidad (unidades/kg)	102 millones
Separación entre planos de grafito (nm)	0.335-0.342	Longitud (mm)	35	Longitud (mm)	12
Diámetro (nm)	100	Diámetro (mm)	0,54	Diámetro (μm)	31
		Relación L/D	65 +/- 15%	Punto de fusión (°C)	163 - 170

Tabla 3.3.- Características de las fibras empleadas como adición

Figura 3.1.- a) Nanofibras de carbono; b) fibras de acero; c) Fibras de polipropileno

- Agua

El agua que se utiliza procede del sistema de suministro del Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid, ya que cumple con las prescripciones técnicas que se establecen para el hormigón estructural.

- Aditivos

No se utiliza ningún tipo de aditivo

- Azufre micronizado técnico

Para refrentado de probetas

- Madera de pino

Madera seca y troceada para permitir el paso de oxígeno (comburente) en el ensayo a fuego y provocar un incendio totalmente desarrollado. La humedad tiene una relación directamente proporcional con la intensidad del fuego y es el factor clave para la propagación. El incendio invertirá gran parte de su energía en su evaporación.

3.2.3.- Dosificaciones y nomenclatura de cada amasada

Para evaluar el efecto de la agresión térmica y de la adición de fibras en estructuras de hormigón, se elaboran 54 probetas cilíndricas y 18 probetas cúbicas con hormigón estructural en masa (HM-25) según la instrucción EHE 08 (Ministerio de Fomento 2010), de conformidad a la dosificación utilizada en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (ETSEM) de la Universidad politécnica de Madrid.

El número de probetas cilíndricas realizadas en función del porcentaje de adición en peso de cemento, se muestra en la tabla 3.4.

	CNFs		CNFs + FA	CNFs + PP	FA		PP		SA
Adición (%)	1	2	1+1	1+1	1	2	1	2	0
Adición (Kg/m³)	23	46	23+23	23+23	23	46	23	46	0
Nº de probetas	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 3.4.- Porcentaje de adición, dosificación en kg/m³ de cemento y número de probetas realizadas para cada tipo

La dosificaciones empleadas para el cemento:arena:grava:agua es 1:2:3:0,5. La cantidad de materiales empleados por probeta en función del tipo de adición se indican en la tabla 3.5.

Materiales	Amasadas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cemento (kg)	3,066		3,066	3,066	3,066		3,066		3,066
Arena (kg)	6,354		6,354	6,354	6,354		6,354		6,354
Grava (kg)	10,962		10,962	10,962	10,962		10,962		10,962
Agua (l)	1,53		1,53	1,53	1,53		1,53		1,53
	CNFs		CNFs + FA	CNFs + PP	FA		PP		SA
Adición (g)	34,2	68,4	34,2 +34,2	68,4 + 68,4	34,2	68,4	34,2	68,4	0

Tabla 3.5.- Dosificaciones en peso de las probetas de hormigón con y sin adición por probeta

La nomenclatura de las probetas cilíndricas con sus respectivas adiciones y sus porcentajes se pueden observar en las tablas 3.6, 3.7 y 3.8. Se confeccionan 3 probetas idénticas de la misma amasada y con las mismas características de estudio para poder obtener un valor de resistencia media de los tres valores obtenidos en los ensayos y de las temperaturas obtenidas en el ensayo a fuego.

Adición	Denominación	Adición	Denominación
CNFs 1%	GF-1%.P1	CNFs 1% + FA 1%	GF-FA.P1
	GF-1%.P2		GF-FA.P2
	GF-1%.P3		GF-FA.P3
	GF-1%.P4.F		GF-FA.P4.F
	GF-1%.P5.F		GF-FA.P5.F
	GF-1%.P6.F		GF-FA.P6.F

CNFs 2%	GF-2%.P1	CNFs 1% + PP 1%	GF-PP.P1
	GF-2%.P2		GF-PP.P2
	GF-2%.P3		GF-PP.P3
	GF-2%.P4.F		GF-PP.P4.F
	GF-2%.P5.F		GF-PP.P5.F
	GF-2%.P6.F		GF-PP.P6.F

Tabla 3.6.- Nomenclatura de las probetas con nanofibras de carbono y su hibridación con fibras de acero o con fibras de polipropileno

Adición	Denominación		Denominación
FA 1%	FA-1%.P1	PP 1%	PP-1%.P1
	FA-1%.P2		PP-1%.P2
	FA-1%.P3		PP-1%.P3
	FA-1%.P4.F		PP-1%.P4.F
	FA-1%.P5.F		PP-1%.P5.F
	FA-1%.P6.F		PP-1%.P6.F
FA 2%	FA-2%.P1	PP 2%	PP-2%.P1
	FA-2%.P2		PP-2%.P2
	FA-2%.P3		PP-2%.P3
	FA-2%.P4.F		PP-2%.P4.F
	FA-2%.P5.F		PP-2%.P5.F
	FA-2%.P6.F		PP-2%.P6.F

Tabla 3.7.- Nomenclatura de las probetas con fibras de acero y fibras de polipropileno

Adición	Denominación
Sin adición	SA.P1
	SA.P2
	SA.P3
	SA.P4. F
	SA.P5.F
	SA.P6.F

Tabla 3.8.- Nomenclatura de las probetas sin adición

Las probetas sin adición y con los distintos porcentajes de fibras se puede observar en la figura 3.2.

Figura 3.2.- Probetas sin adición y con sus distintos porcentajes de adición

El número de probetas cúbicas realizadas para llevar a cabo los ensayos de conductividad térmica conforme a la norma ASTM D5334 (2016) en función del tipo y porcentaje de adición en peso de cemento, se pueden observar en la tabla 3.9.

	CNFs		CNFs + FA		CNFs + PP		FA		PP		SA
Adición (%)	1	2	1+1		1+1		1	2	1	2	0
Adición (Kg/m³)	23	46	23+23		23+23		23	46	23	46	0
Nº de probetas	2	2	2		2		2	2	2	2	2

Tabla 3.9.- Porcentaje de adición, dosificación en kg/m³ de cemento y número de probetas realizadas para cada tipo

La dosificaciónes que se emplean para el cemento:arena:grava:agua es 1:2:3:0,5. La cantidad de materiales empleados por probeta en función del tipo de adición se indican en la tabla 3.10.

Materiales	Amasadas				
	1	2	3	4	5
Cemento (kg)	1,097	1,097	1,097	1,097	1,097
Arena (kg)	2,2753	2,2753	2,2753	2,2753	2,2753
Grava (kg)	3,9254	3,9254	3,9254	3,9254	3,9254
Agua (l)	0,547	0,547	0,547	0,547	0,547
Adición (g)	CNFs		CNFs + FA		CNFs + PP
	12,246	24,49	12,246 + 12,246		12,246 + 12,246
	FA		PP		SA
	12,246	24,49	12,246	24,49	0

Tabla 3.10.- Dosificaciones en peso de las probetas con y sin adición por probeta

La nomenclatura de las probetas cúbicas con sus respectivas adiciones y sus porcentajes se pueden observar en la tabla 3.11 Se confeccionan 2 probetas cúbicas de cada tipo, según lo establecido por la norma ASTM D5334 (2016) para el ensayo de conductividad térmica.

Adición	Denominación	Adición	Denominación		Denominación
Sin adición		CNFs 1%	GF-1%.P1.CT	CNFs 1% + Fibra de Acero	GF-FA.P1.CT
			GF-1%.P2.CT		GF-FA.P2.CT
		CNFs 2%	GF-2%.P1.CT	CNFs 1% + Fibra de Polipropileno	GF-PP.P1.CT
			GF-2%.P2.CT		GF-PP.P2.CT
	SA.P1.CT	Fibra de Acero 1%	FA-1%.P1.CT	Fibra de Polipropileno 1%	PP-1%.P1.CT
			FA-1%.P2.CT		PP-1%.P2.CT
		Fibra de Acero 2%	FA-2%.P1.CT	Fibra de Polipropileno 2%	PP-2%.P1.CT
			FA-2%.P2.CT		PP-2%.P2.CT

Tabla 3.11.- Nomenclatura probetas cúbicas, sin adición, con fibras de acero y fibras de polipropileno

La figura 3.3 muestra las probetas cúbicas empleadas para la realización del ensayo de conductividad térmica, con sus distintas adiciones y porcentajes.

Figura 3.3.- Probetas cúbicas sin adición y con sus distintos porcentajes de adición

3.2.4.- Proceso de fabricación del hormigón

El proceso de fabricación del hormigón fresco y en estado plástico que se describe a continuación se repite para cada una de las amasadas elaboradas, teniendo en cuenta las adiciones incorporadas para cada una de ellas.

En primer lugar, y previamente al inicio de la fabricación del hormigón, los materiales se mantienen 24 horas en condiciones de laboratorio. Se tamiza la grava para garantizar que no existan áridos de tamaño superior a 12 mm. Hay que considerar que la grava viene con diferentes tamaños en el interior, para conseguir que en una probeta exista un tamaño apropiado de árido se lleva a cabo la operación de tamizado, donde aceptamos lo que pasa por el tamiz de

12 mm y se rechaza lo que se queda en el resto. Se utiliza la tamizadora mecánica para hacerlo de una manera más rigurosa, según se puede observar en la figura 3.4.

Figura 3.4.- Proceso de tamizado de la grava

Se procede al pesado por separado de cada uno de los materiales a utilizar, cemento, arena, grava, adición y agua, con una báscula industrial tipo dial y con una báscula digital hasta el gramo de exactitud según se muestra en la figura 3.5.

Figura 3.5.- Básculas para pesar los diferentes materiales empleados en la fabricación de las probetas

El amasado se realiza en una amasadora planetaria de eje vertical con una capacidad máxima de 100 litros y capacidad de trabajo de 75 litros, donde se introducen los materiales en el siguiente orden: grava, cemento, y por último, la arena. Una vez incorporados todos los materiales, excepto el agua en la amasadora, se inicia el proceso de amasado con la ayuda de las paletas rotatorias de la hormigonera, con una duración aproximada de 2 minutos con el propósito de homogeneizar toda la mezcla en seco. Posteriormente, se vierte el agua progresivamente, teniendo en cuenta el contenido de humedad de los áridos y hasta conseguir una consistencia plástica del hormigón. La duración del proceso de amasado es de 5 minutos aproximadamente incluidos los minutos de amasado en seco.

Cuando se incorpora a la masa de hormigón la adición de fibras de acero, de polipropileno o las nanofibras de carbono (CNFs), se procede al amasado manualmente en gaveta de manera más exhaustiva, mediante movimiento con la paleta hasta conseguir una perfecta homogeneización.

La fase de amasado mecánico y manual se observa en la figura 3.6.

Figura 3.6.- Proceso de amasado manual y mecánico en probetas con y sin adiciones

3.2.5.- Proceso de elaboración de las probetas de hormigón fresco

Una vez elaborado el hormigón fresco de cada una de las amasadas realizadas, se procede al llenado de los moldes (figura 3.7), cuyas características geométricas cumplen, en todo caso, la norma de ensayos de hormigón endurecido (AENOR 2013).

Figura 3.7.- Proceso de elaboración de las probetas cilíndricas y cúbicas

Una vez confeccionado el hormigón se llenan los moldes, según la norma de ensayos de hormigón fresco (AENOR 2009b). Se llenan los moldes en tres tongadas compactando el hormigón con una barra compactadora de acero, picando 25 veces cada capa, hasta enrasar el molde con el hormigón. Posteriormente se enrasan los moldes y se mantienen durante 24 horas a temperatura ambiente de laboratorio a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa aproximada del 60%, antes de proceder a su desencofrado. Este proceso se muestra en la figura 3.8.

Figura 3.8.- Proceso experimental de elaboración de probetas con y sin adiciones

En el caso de las probetas cúbicas, una vez llenos y enrasados los moldes se introduce una varilla metálica del mismo espesor que la varilla de sonda TR-1 que se utiliza para el ensayo de conductividad térmica, con el fin de que una vez endurecida la probeta, quede el orificio apto para la sonda. Transcurridas 3 horas, se saca la varilla metálica y al igual que las probetas cilíndricas, se mantienen durante 24 horas a temperatura ambiente de laboratorio a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa aproximada del 60%, antes de proceder a su desencofrado. Transcurrido este tiempo, se desmoldan y se guardan en una cámara de curado a temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 95\%$ durante 28 días.

Transcurrido este tiempo, se desmoldan y se guardan en una cámara de curado a temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 95\%$ durante 28 días como se muestra en la figura 3.9.

Figura 3.9.- Proceso experimental correspondiente al curado de las probetas en cámara húmeda

3.3. Planificación de los ensayos

3.3.1.- Estructura de los ensayos realizados

El programa de ensayos realizado se ha estructurado en tres fases. En la primera fase, se estudia el comportamiento mecánico del hormigón, mediante el ensayo a rotura por compresión, antes y después de someter al hormigón a un ensayo a fuego directo. Para ello, se realizan las probetas cilíndricas indicadas en las tablas 3.6, 3.7 y 3.8. La mitad de las mismas se somete al ensayo de rotura a compresión, mientras que la mitad restante, se somete a un ensayo a fuego directo. Una vez enfriadas a temperatura ambiente las probetas sometidas a la agresión térmica, se ensayan también a rotura por compresión (tabla 3.12).

Probetas cilíndricas			
Tipo de ensayo	Denominación	Denominación	Tipo de ensayo
Ensayo a rotura por compresión	SA-P1; SA-P2; SA-P3	SA-P4.F; SA-P5.F; SA-P6.F	Fuego directo + Ensayo a rotura por compresión
	GF-1%.P1; GF-1%.P2; GF-1%.P3	GF-1%.P4.F; GF-1%.P5.F; GF-1%.P6.F	
	GF-2%.P1; GF-2%.P2; GF-2%.P3	GF-2%.P4.F; GF-2%.P5.F; GF-2%.P6.F	
	GF-FA.P1; GF-FA.P2; GF-FA.P3	GF-FA.P4.F; GF-FA.P5.F; GF-FA.P6.F	
	GF-PP.P1; GF-PP.P2; GF-PP.P3	GF-PP.P4.F; GF-PP.P5.F; GF-PP.P6.F	
	FA-1%.P1; FA-1%.P2; FA-1%.P3	FA-1%.P4.F; FA-1%.P5.F; FA-1%.P6.F	
	FA-2%.P1; FA-2%.P2; FA-2%.P3	FA-2%.P4.F; FA-2%.P5.F; FA-2%.P6.F	
	PP-1%.P1; PP-1%.P2; PP-1%.P3	PP-1%.P4.F; PP-1%.P5.F; PP-1%.P6.F	
	PP-2%.P1; PP-2%.P2; PP-2%.P3	PP-2%.P4.F; PP-2%.P5.F; PP-2%.P6.F	

Tabla 3.12.- Ensayos realizados en las probetas cilíndricas

Una vez realizada esta fase, se procede a elaborar probetas cúbicas con los mismos materiales y dosificaciones empleados en las probetas cilíndricas, sobre los que se realiza el ensayo de conductividad térmica (tabla 3.13).

Probetas cúbicas			
Tipo de ensayo	Denominación	Denominación	Tipo de ensayo
Conductividad térmica	SA.P1.CT; SA.P2.CT		Conductividad térmica
	GF-1%.P1.CT; GF-1%.P2.CT	GF-2%.P1.CT; GF-2%.P2.CT	
	GF-FA.P1.CT; GF-FA.P2.CT	GF-PP.P1.CT; GF-PP.P2.CT	
	FA-1%.P1.CT; FA-1%.P2.CT	FA-2%.P1.CT; FA-2%.P2.CT	
	PP-1%.P1.CT; PP-1%.P2.CT	PP-2%.P1.CT; PP-2%.P2.CT	

Tabla 3.13.- Ensayos realizados en las probetas cúbicas

En una última fase, se procede a estudiar mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), el hormigón procedente de las probetas cilíndricas, de las que se toma muestras y se preparan tanto en corte fresco como en lámina delgada para su estudio, según se indica en la tabla 3.14.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)			
Tipo de ensayo	Denominación	Denominación	Tipo de ensayo
Corte fresco	SA-P3; SA-P4.F		Lámina delgada
	GF-1%.P1; GF-1%.P5.F		
	GF-2%.P1; GF-2%.P5.F	GF-2%.P1; GF-2%.P5.F	
	GF-FA.P3; GF-FA.P5.F		
	GF.PP.P2; GF.PP.P4.F		

Tabla 3.14.- Ensayos realizados con muestras de corte fresco y lámina delgada extraídos de las probetas cilíndricas antes y después del ensayo a fuego

La descripción y detalle de los distintos tipos de ensayo, se muestran en los siguientes apartados.

3.3.2.- Ensayo a fuego directo

Una vez elaboradas las probetas, indicadas anteriormente en la tabla 3.12 se someten a un ensayo de fuego directo. El escenario de fuego utilizado en este trabajo para poner de manifiesto los efectos no visibles que provoca el fuego en el interior de la matriz del hormigón se ha llevado a cabo en lo que pretende ser un escenario de fuego realista. A partir de altas temperaturas y duraciones del fuego propuestas en las normas, se utiliza un equipo conformado con bandeja y parrilla de ensayo a fuego, bajo el método normalizado por la norma ISO 834-1:1999 (2015a) y EN-UNE 1363-1 (AENOR 2015b), siendo ésta la curva paramétrica más utilizada (figura 3.10). Se trata de la norma utilizada en el Documento Básico para la Seguridad en caso de Incendio (DB-SI). El ensayo a fuego confeccionado, tienen un grado de incertidumbre significativo de la medida, pues no es posible cuantificar numéricamente la cantidad de factores que influyen en él. Se trata de aunar los diferentes criterios establecidos en las normas UNE-EN 1363-1, UNE-EN 1363-2 y UNE-EN 1365-4 (AENOR 2015b, AENOR 2000a, AENOR 2000b), e intentar reproducir las condiciones lo más asimilables posibles a un incendio real en el interior de un edificio y estudiar la exposición del elemento estructural a fuego directo.

Figura 3.10.- Fases de desarrollo de un incendio

Existen multitud de factores que afectan al resultado de resistencia al fuego. Aquellos referidos con la variabilidad introducida por las muestras de ensayo, incluyendo en esto sus materiales, procesos de ejecución y fabricación, factores que influyen en el resultado. Se colocan las muestras intentando ser expuestas a condiciones severas, pero en este caso encontramos la posibilidad adicional de una disipación del calor, generando una curva de nivel más bajo de exposición térmica que en otras opciones.

El ensayo de las probetas simula pilares sometidos al fuego en todas sus caras por igual. Los procedimientos operatorios se han redactado para el supuesto de ensayo de miembros portantes verticales sometidos a cargas por compresión. Se ha despreciado las condiciones de soporte de los extremos durante el ensayo a fuego. El pilar-probeta se ensayará únicamente a fuego, para posteriormente en frío valorar sus condiciones de apoyo y cargas.

Con la premisa de reproducir el tipo de exposición del hormigón en un incendio real, provocando diferencias reales de temperatura entre las distintas zonas del elemento estructural, se establece en el ensayo de resistencia al fuego directo un fuego medio de potencial calorífico 40 kg/m^2 , que es un valor medio del potencial calorífico que se produce en un incendio de un edificio. El valor calorífico de la madera seca es de 19 MJ / kg y se han utilizado 40 kg de

madera, generándose en el ensayo una energía calorífica de 181.640 kcal de aplicación universal en potencia calorífica y exposición. Para la realización del ensayo a fuego, se colocan las probetas verticalmente simulando los soportes de un edificio, quedando toda su superficie en contacto directo con el fuego. Todas las probetas son colocadas sobre una parrilla de acero situada encima de una bandeja de ensayo de 1m² de superficie, cargada con 40 kg de madera troceada para permitir una mayor oxigenación del incendio y favorecer la combustión en su origen, así como incentivada con una pulverización de gasolina para favorecer el inicio de la combustión. Se colocan las probetas a tresbolillo y de forma aleatoria como sucedería en un incendio real, quedando expuesta toda su superficie en contacto directo con el fuego, soportando las altas temperaturas y la evolución del incendio totalmente desarrollado y posterior decaimiento del mismo. Para que el incendio mantenga las mejores condiciones de confinamiento y evitar otras variables distorsionantes, se realiza en un espacio confinado (cuarto de humos) diseñado para simulacros de evolución de incendios en el Servicio de Bomberos de la Comunidad de Madrid.

En la figura 3.11 se muestra la bandeja para el ensayo a fuego donde se ubican las probetas en posición vertical sobre el soporte de acero. Se establecen unas toberas inferiores en la base de la bandeja que permiten el paso de aire para mantener la combustión con aportación de oxígeno.

Figura 3.11.- Bandeja y parrilla de ensayos a fuego real

El ensayo se realiza siguiendo el método normalizado por la ISO 834-11:2014 (AENOR, 2014), donde las mediciones de la temperatura son llevadas a cabo mediante un termómetro infrarrojo compacto modelo “Testo 845”. Las mediciones se realizan en etapas de 15 minutos en la primera fase de estudio de la experimentación. En la segunda fase de experimentación con las probetas de hormigón con adición de CNFs y su combinación con otras fibras, tras el aprendizaje de la experiencia, el ensayo a fuego se lleva a cabo con mediciones cada 5 minutos. El termómetro infrarrojo nos permite tomar a distancia la temperatura en la superficie de la probeta. No se pueden conocer las temperaturas alcanzadas en el interior de la masa de hormigón, pues no se utilizan termopares internos.

El proceso experimental del ensayo a fuego se puede observar en la figura 3.12, donde se observa la madera empleada como carga calorífica, las probetas sometidas directamente a la acción del fuego y la medición de la temperatura alcanzada en la superficie de las probetas mediante el termómetro infrarrojo compacto modelo “Testo 845”.

Figura 3.12.- Proceso experimental durante el ensayo a fuego

Una vez transcurrido el tiempo de 1 hora de exposición al fuego, las probetas se enfrían lentamente, disipando su calor hasta alcanzar la temperatura ambiente (20°C). Consumida la cantidad de material combustible y sin someter a enfriamiento rápido a las probetas, el calor se disipa totalmente para proceder a la retirada de cada una de ellas. Con el enfriamiento lento, se evita una mayor retracción de tensiones en la estructura, para disminuir la fisuración del elemento estructural. Una vez ensayadas a fuego, se procede a medir su resistencia a compresión para conocer y evaluar la capacidad resistente residual de una estructura dañada por el efecto de la alta temperatura, comparando hormigones con y sin adición entre sí y antes y después de la agresión térmica.

3.3.3.- Ensayo de resistencia a compresión

Para la realización de los ensayos a compresión se procede en primer lugar al refrentado de las probetas según la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR 2011b). El refrentado se realiza con mortero de azufre, mediante un equipo de refrentado y aceite mineral para desmoldar el plato. Partiendo de la superficie de la probeta seca y limpia, se lleva a cabo el refrentado con una capa inferior a 5 mm de grosor. La mezcla se calienta a la temperatura recomendada hasta que se alcanza la consistencia requerida. Se baja un extremo de la probeta, mantenida verticalmente, hasta apoyar en el plato horizontal que contiene la mezcla de azufre. Se deja que la mezcla se endurezca, para ello se utiliza un equipo de refrentado y se utiliza aceite mineral para desmoldar. El proceso se puede observar en la figura 3.13.

Figura 3.13.- Proceso experimental de refrentado de las probetas

Para la realización del ensayo a compresión según la norma UNE-EN 12390-3:2009, se colocan las probetas en la prensa universal IBERTEST MIB 60/AM. Se aplica una precarga del 10% de la carga máxima del ensayo, con la finalidad de que el plato superior quede uniformemente apoyado en la cara

superior de la probeta, momento en el que se realiza el ensayo de resistencia a compresión por carrera, con el fin de obtener los datos de fuerza en kN y carrera en mm mediante el programa informático de la prensa. Durante el ensayo también se observa las deformaciones de la probeta, haciendo una inspección visual de las mismas (figura 3.14).

Figura 3.14.- Ensayo experimental de rotura a compresión

3.3.4.- Ensayo de conductividad térmica

Los ensayos de conductividad térmica se realizan sobre las probetas cúbicas indicadas en la tabla 3.13 mediante el “Dispositivo Decagon”, en el laboratorio de I+D+I de la empresa SIKA (figura 3.15). El método en el que se basa el equipo de medida de la conductividad térmica consiste en hacer pasar un pulso de calor a través del hormigón y medir el tiempo de respuesta del mismo. Para realizar el ensayo de conductividad térmica, las probetas se mantienen en una cámara climática a 20°C y 50% de humedad relativa durante una semana, momento en el cual y bajo esas mismas condiciones se realiza el ensayo (figura 3.15).

Figura 3.15.- Equipo “Decagon” y sonda TR-1, preparada para el ensayo de conductividad térmica

El procedimiento de ensayo se realiza según la norma ASTM D5334 (2016). Se introduce la sonda TR-1 en el orificio practicado por la varilla y se deja 15 minutos para que la temperatura de la sonda TR-1 se equilibre con la temperatura de la probeta. Una vez transcurrido este tiempo, se realizan las medidas en las probetas de ensayo y cada una de las mediciones se repite 3 veces, de acuerdo con la norma, y se calcula la media de las conductividades térmicas medidas en W / mK . En algunas de las probetas es necesario realizar un orificio mayor mediante un taladro. En estos casos se emplea la sonda RK-1 junto con una mínima cantidad de pasta térmica superconductora que se introduce con la ayuda de una jeringuilla para rellenar los huecos que hubiese podido crear la broca en el hormigón.

3.3.5.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La caracterización química y microscópica de las probetas después de ser ensayadas a rotura por compresión se realiza mediante la técnica de la microscopía electrónica de barrido (MEB) o Scanning Electron Microscopy (SEM) que nos permite caracterizar las muestras a nivel estructural, examinando la estructura interna del hormigón con adición de nanofibras, fibras y mezcla de ambas y compararla con el hormigón sin adición.

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) consiste en un microscopio electrónico de barrido con detector de energía dispersiva (SEM-EDX) que

permite obtener imágenes microscópicas del material. Las imágenes que se muestran en el apartado 4.7, se obtienen con electrones secundarios y retrodispersados, estos últimos nos dan información de variaciones composicionales de la muestra, mientras que los primeros permiten observar la textura y características morfológicas de las fases analizadas.

La escala de trabajo utilizada, comprende aumentos que van desde 50 hasta 10000. Con el detector de rayos X (EDX) se realizan microanálisis puntuales y zonales de elementos mayoritarios en las muestras de rotura natural.

El equipo empleado es el Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-820 con microanálisis. El software que utiliza el equipo para la adquisición, tratamiento y evaluación de los análisis es el EDX Oxford ISIS-Link. (Figura 3.16).

Figura 3.16.- Microscopio electrónico de barrido

Antes de introducir las muestras en el microscopio, se preparan eligiendo los fragmentos más adecuados de las probetas por el método de corte fresco, para conseguir la superficie más característica. A partir de un recubrimiento de oro (figura 3.17), se consigue que la superficie sea conductora y, de esta forma, favorecer que los electrones que inciden sobre la superficie de la probeta sean capaces de moverse y generar la imagen de estudio.

Figura 3.17.- Preparación de muestras mediante corte fresco

Dado el tamaño de las nanofibras de carbono (CNFs), se procedió también a realizar el ensayo mediante la Microscopía Electrónica de Barrido mediante la preparación de las muestras con lámina delgada, de modo que se pudiesen observar a nivel microscópico las nanofibras de carbono (figura 3.18)

Figura 3.18.- Preparación de muestras con lámina delgada

Una vez preparadas las muestras, se introducen en el microscopio y son barridas con los electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectadas en una imagen digital.

A la vez que se toman las imágenes en el microscopio electrónico de barrido, el Sistema INCA permite, mediante un detector de rayos X, obtener el análisis semicuantitativo de la composición química elemental de los materiales analizados.

CAPÍTULO 4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.- Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos tras el desarrollo del programa experimental descrito en el capítulo anterior. Se incorporan los ensayos indicados en la parte experimental correspondientes al capítulo 3, divididos en apartados en función del estudio realizado.

En primer lugar se indica el estudio que muestra los resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs), con hibridación de CNFs y acero, con hibridación de CNFs y polipropileno, con adición de fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno y sin adición. En estos resultados se muestran las temperaturas alcanzadas en función del tiempo y el nivel de daño producido en las probetas para las diferentes temperaturas.

Posteriormente se indican los resultados obtenidos en los ensayos a compresión en probetas de hormigón de los diferentes tipos de hormigón estudiados con sus diferentes adiciones y porcentajes, después del ensayo a fuego directo. Este mismo estudio de resistencia a compresión, se lleva a cabo en las probetas de cada tipo de hormigón estudiado sin haberlo sometido al ensayo de fuego.

A continuación se muestran los resultados de la conductividad térmica realizados en todos los hormigones estudiados, con sus distintas adiciones y porcentajes.

Por último se indican los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) en todos los tipos de hormigones estudiados, antes y después del ensayo a fuego.

4.2.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs), con adición hibridada de CNFs y acero, con adición hibridada de CNFs y polipropileno, con adición de fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno y sin adición

4.2.1.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y su hibridación con fibras de polipropileno y con acero

En el presente apartado se muestran las temperaturas alcanzadas por hormigones con adición de CNFs, en función del tiempo de exposición al incendio, obtenidas en el ensayo de resistencia a un fuego real con exposición

directa a las llamas, establecido en el Servicio de Bomberos de la Comunidad de Madrid.

Para evaluar el efecto de la acción directa del fuego, se miden las temperaturas cada 5 minutos en la parte inferior, media y superior de la superficie de cada probeta estudiada. La tablas 4.1 y 4.2 muestran esas temperaturas en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de CNFs. Según se puede observar, las temperaturas son mayores en la parte inferior de las probetas. Se alcanzan unas temperaturas medias máximas a nivel de probeta de 432°C en probetas de hormigón con adición de 1% de CNFs y de 516,56°C en probetas de hormigón con adición del 2% de CNFs en peso de cemento.

Tiempo (minutos)	Temperaturas medias GF-1%.F (°C)			
	Zona Inferior	Zona Media	Zona Alta	Probeta
0	20,00	20,00	20,00	20,00
5	484,66	360,66	315,00	386,00
10	581,66	372,33	343,33	432,00
15	340,00	247,66	205,00	264,00
20	306,33	215,66	164,33	228,00
25	289,33	187,00	136,66	204,00
30	276,33	196,00	137,66	203,00
35	228,66	164,66	121,66	171,00
40	219,00	161,33	117,66	165,00
45	230,33	149,00	104,00	161,00
50	217,33	139,33	93,66	149,00
55	130,33	112,67	81,33	108,00
60	118,33	105,33	79,00	100,00

Tabla 4.1.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, durante el ensayo a fuego

Tiempo (minutos)	Temperaturas medias GF-2%.F (°C)			
	Zona Inferior	Zona Media	Zona Alta	Probeta
0	20,00	20,00	20,00	20,00
5	561,00	510,33	478,33	516,56
10	596,67	468,67	418,33	494,56
15	313,33	214,00	191,00	239,44
20	318,00	229,33	178,67	242,00
25	324,00	223,33	167,33	238,22
30	276,33	210,00	146,33	210,89
35	251,33	184,33	134,00	189,89
40	228,00	176,33	126,67	177,00
45	280,00	168,33	112,33	186,89
50	211,00	152,33	103,00	155,44
55	131,33	117,00	86,67	111,67
60	112,33	112,67	82,00	102,33

Tabla 4.2.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con adición del 2% de CNFs en peso de cemento, durante el ensayo a fuego

La tablas 4.3 y 4.4 muestran las temperaturas alcanzadas en el ensayo a fuego directo en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero y CNFs con fibras de polipropileno. Según se puede observar, las temperaturas medias máximas alcanzadas a nivel de probeta son de 418°C en probetas con hibridación de CNFs y fibras de acero y de 444°C en probetas con hibridación de CNFs y fibras de polipropileno.

Tiempo (minutos)	Temperaturas medias – GF-FA.F (°C)			
	Zona Inferior	Zona Media	Zona Alta	Probeta
0	20,00	20,00	20,00	20,00
5	497,00	312,00	349,00	386,00
10	547,00	367,00	340,00	418,00
15	303,00	201,00	153,00	219,00
20	316,00	247,00	159,00	240,67
25	250,00	183,00	143,00	192,00
30	284,00	163,00	158,00	201,67
35	216,00	165,00	125,00	168,67
40	206,00	162,00	119,00	162,33
45	219,00	146,00	105,00	156,67
50	201,00	137,00	94,00	144,00
55	128,00	108,00	83,00	106,33
60	119,00	103,00	81,00	101,00

Tabla 4.3.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero, durante el ensayo a fuego

Tiempo (minutos)	Temperaturas medias – GF-PP.F (°C)			
	Zona Inferior	Zona Media	Zona Alta	Probeta
0	20,00	20,00	20,00	20,00
5	478,00	371,00	382,00	410,33
10	578,00	385,00	369,00	444,00
15	297,00	250,00	180,00	242,33
20	304,00	198,00	161,00	221,00
25	152,00	203,00	152,00	169,00
30	306,00	191,00	142,00	213,00
35	220,00	168,00	130,00	172,67
40	235,00	164,00	125,00	174,67
45	264,00	147,00	107,00	172,67
50	200,00	137,00	95,00	144,00
55	125,00	107,00	79,00	103,67
60	112,00	102,00	70,00	94,67

Tabla 4.4.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, durante el ensayo a fuego

4.2.2.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón con adición de fibras de acero y con adición de fibras de polipropileno

A continuación se muestran los resultados del ensayo a fuego realizado en probetas de hormigón con adición de fibras de acero y fibras de polipropileno. En este estudio se incorpora una variante en las mediciones de temperatura, donde las medidas de la misma son tomadas cada 15 minutos en la parte central de la probeta. Obteniendo resultados más distantes y de menor exactitud que en el ensayo anterior.

La tabla 4.5 muestra las temperaturas alcanzadas en el ensayo a fuego directo en probetas de hormigón con adición de fibras de acero y con adición de fibras de polipropileno. Según se puede observar, se alcanzan unas medias máximas a nivel de probeta alrededor de 400 °C y la media de temperatura en la superficie del hormigón es de 200 °C $\pm$ 15 en todo el ensayo.

	Tiempo (minutos)				
	15	30	45	60	
Temperaturas (°C)	FA-1%.P4.F	65	104	354	289
	FA-1%.P5.F	149	247	250	173
	FA-1%.P6.F	95	180	291	239
	FA-2%.P4.F	45	106	143	174
	FA-2%.P5.F	112	250	413	308
	FA-2%.P6.F	90	172	284	233
	PP-1%.P4.F	108	226	447	173
	PP-1%.P5.F	86	169	337	253
	PP-1%.P6.F	58	108	313	278
	PP-2%.P4.F	68	110	374	296
	PP-2%.P5.F	87	244	255	239
	PP-2%.P6.F	96	101	327	187

Tabla 4.5.- Mediciones de las temperaturas en probetas de hormigón con adición de fibras de acero y fibras de polipropileno, durante el ensayo a fuego

La figura 4.1 presenta los cambios superficiales, texturales y el aspecto exterior de las probetas de hormigón con adición de fibras de acero sometidas a la incidencia de un fuego real con exposición directa a las llamas en toda su superficie. La forma geométrica del elemento y la adherencia de los productos incandescentes de desecho del incendio (cenizas, humo y escorias) contribuyen al aumento de temperatura del hormigón. La forma cilíndrica de las probetas por su directriz curva son más afectadas de cara a una exposición al fuego que los elementos con forma cuadrada o rectangular, elevando su temperatura en toda la superficie de manera homogénea.

Figura 4.1.- Gráfica temperatura/tiempo en probetas de hormigón con adición de fibras de acero 1%-2% durante 1 hora de ensayo a fuego

La figura 4.2 muestra los cambios y aspecto exterior de las probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno sometidas a la incidencia de un fuego real.

Figura 4.2.- Gráfica tiempo/temperatura en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno 1%-2% durante 1 hora de ensayo a fuego

4.2.3.- Resultados del ensayo a fuego en probetas de hormigón sin adiciones

A continuación se muestran las temperaturas alcanzadas en el ensayo a fuego directo, en las probetas de hormigón sin adiciones (tabla 4.6).

Tiempo (minutos)	Temperaturas medias – Sin adición (°C)			
	Zona Inferior	Zona Media	Zona Alta	Probeta
0	20,00	20,00	20,00	20,00
5	442,00	370,33	347,33	375,00
10	540,66	437,66	403,66	460,00
15	238,00	141,66	129,33	169,00
20	302,66	211,00	159,00	224,00
25	273,00	156,66	151,00	204,00
30	234,66	182,00	113,30	176,00
35	243,00	165,00	127,66	178,00
40	226,00	161,33	120,33	169,00
45	209,00	147,00	107,33	154,00
50	173,67	135,66	96,66	135,00
55	123,33	111,00	85,00	173,00
60	120,66	108,00	83,33	103,00

Tabla 4.6.- Valores medios de temperatura medidos en probetas de hormigón sin adición, durante el ensayo a fuego

La figura 4.3 muestra los cambios y el aspecto exterior de las probetas de hormigón sometidas al desarrollo completo de un incendio con enfriamiento lento para evitar retracciones en las capas internas del hormigón. La evolución del incendio tiene un tiempo de duración de una hora siguiendo el método normalizado por la ISO 834-1:1999 (2015a) y EN-UNE 1363-1 (AENOR 2015b). La carga de fuego se consigue utilizando como material combustible la madera, pues se trata del material empleado para los ensayos de fuego, aportando 40Kg/m² de poder calorífico. Durante la hora de ensayo se toman cuatro mediciones de temperatura a intervalos de 15 minutos, para ello se hizo uso de un termómetro infrarrojo compacto llamado “testo 845”, capaz de hacer la medición sin contacto con las probetas, midiendo las temperaturas de la superficie del hormigón. Con este ensayo se pretende, entre otras, observar los

cambios de coloración en el hormigón, que sirven a la vez como indicadores de la pérdida de la resistencia mecánica, así como la comprobación del nivel de fisuración provocado por el efecto de la temperatura. Dada la temperatura de elevación a máximos en torno a 400 °C, no se aprecian variaciones en la coloración del hormigón de modo significativo.

Figura 4.3.- Gráfica temperatura/tiempo en probetas de hormigón sin adición durante 1 hora de ensayo a fuego

4.3.- Diagramas tipo de los ensayos a compresión

En este apartado se explica el tipo de diagrama que se utiliza para analizar los datos obtenidos en el ensayo de rotura por compresión de todas las probetas de hormigón ensayadas a compresión. De cada probeta de hormigón se elabora un diagrama de tensión-deformación que nos permite estudiar de manera más gráfica, los valores más característicos y significativos del ensayo y analizar los resultados analíticamente.

A partir de los datos obtenidos en el ensayo a compresión con la prensa universal MIB 60/AM, con una cantidad de 15000 datos proporcionados aproximadamente por cada probeta, se obtiene una gráfica fuerza (F) en kN / carrera (δ) en mm, con todos los resultados. La figura 4.4 muestra la gráfica tipo utilizada.

Figura 4.4.- Gráfica modelo de fuerza "F" (kN)/ carrera " δ " (mm) del hormigón ensayado a compresión

Como lo que nos interesa realmente es el valor de la resistencia del hormigón, a partir de los datos de la fuerza "F" en kN y del área de la sección " A_c " de la probeta cilíndrica en mm² y la longitud de la misma, se obtienen los resultados de tensión a compresión del hormigón en N/mm² " σ_c " y los de deformación longitudinal unitaria del hormigón adimensional " ϵ_c ".

Donde: $\sigma_c = kN / A_c$ [4.1]

$\epsilon_c = \Delta L / L$ [4.2]

Con estos datos se elaboran las gráficas tensión-deformación y se analizan los resultados, para extraer lo significativo que nos arroja el ensayo.

A continuación se explican los datos que se obtienen a partir de una gráfica de tensión-deformación tipo, siendo los datos más característicos del ensayo, los que se muestran en la figura 4.5.

Figura 4.5.- Modelo de gráfica tensión " σ_c " (N/mm²)/ deformación " ϵ_c " del hormigón ensayado a compresión

Donde:

$\sigma_{\text{máxima}}$ tensión máxima del hormigón

$\sigma_{\text{última}}$ tensión última del hormigón

$\epsilon_{\text{máxima}}$ deformación máxima del hormigón

$\epsilon_{\text{última}}$ deformación última del hormigón

$E_{\text{máxima}}$ densidad de energía deformación máxima (N/mm²)

$E_{\text{última}}$ densidad de energía de deformación última (N/mm²)

4.4.- Resultados de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con distintas adiciones y porcentajes, después del ensayo a fuego directo

4.4.1.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs), después del ensayo a fuego

A continuación se muestran los resultados analíticos de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) en 1% y 2% en peso de cemento, después de someter a las probetas al ensayo de fuego directo. Los datos medios más importantes del ensayo se muestran en la tabla 4.7.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
GF-1%.P4.F	20,463	2,049	3,635	7,760	4,460	8,501
GF-1%.P5.F	25,549	2,556	4,735	8,590	7,174	12,287
GF-1%.P6.F	20,549	2,057	3,835	7,595	4,544	7,982
Valores medios	22,187	2,221	4,068	7,981	5,393	9,590
GF-2%.P4.F	17,733	1,775	3,115	7,265	3,364	7,393
GF-2%.P5.F	18,336	1,848	4,255	7,780	4,486	8,211
GF-2%.P6.F	19,820	1,985	3,880	7,800	4,841	9,225
Valores medios	18,630	1,869	3,750	7,615	4,230	8,276

Tabla 4.7.- Valores medios más representativos del ensayo a compresión de probetas de hormigón con adición de CNFs, después del ensayo a fuego

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran las gráficas de tensión-deformación en los ensayos a compresión en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) en 1% y 2% en peso de cemento, después de someter a las probetas al ensayo de fuego directo.

Figura 4.6.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento, después del ensayo a fuego

Figura 4.7.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento, después del ensayo a fuego

4.4.2.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición híbrida de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero, después del ensayo a fuego

La tabla 4.8 muestra los valores más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
GF-FA.P4.F	19,681	1,985	3,820	8,235	5,013	9,308
GF-FA.P5.F	19,428	1,949	4,460	8,120	5,396	9,563
GF-FA.P6.F	20,329	2,033	3,315	7,515	3,855	7,942
Valores medios	19,813	1,989	3,865	7,957	4,755	8,938

Tabla 4.8.- Valores medios más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero, después del ensayo a fuego

Según se puede observar en la figura 4.8, los valores de la gráfica tensión-deformación de las tensiones máximas son similares en las tres probetas ensayadas, con valores próximos a 20 N/mm².

Figura 4.8.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero, después del ensayo a fuego

4.4.3.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición híbrida de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego

La tabla 4.9 muestra los valores más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, después de estar sometidas al ensayo a fuego.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\varepsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
GF-PP.P4.F	21,182	2,120	3,360	8,730	4,183	9,068
GF-PP.P5.F	16,836	1,685	3,545	7,440	3,852	7,806
GF-PP.P6.F	18,746	1,883	4,140	6,150	4,670	7,186
Valores medios	18,921	1,896	3,682	7,440	4,235	8,020

Tabla 4.9.- Valores medios más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego

Según se puede observar en la figura 4.9, los valores de las tensiones máximas que muestra la gráfica oscilan en un rango de 17 N/mm² a 21 N/mm², obteniéndose valores de las deformaciones unitarias últimas en el rango de 0,006 a 0,0085.

Figura 4.9.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego

4.4.4.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno, después del ensayo a fuego

La tabla 4.10 muestra los valores máximos y últimos de las tensiones, deformaciones y densidades de energía de deformación en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno en 1% y 2% en peso de cemento, después de someterlas a un ensayo de agresión térmica de un fuego directo.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
PP-1%.P4.F	32,865	9,543	6,820	9,410	10,389	16,808
PP-1%.P5.F	36,238	8,034	6,510	9,425	10,940	17,086
PP-1%.P6.F	28,543	11,202	6,720	9,420	9,399	15,033
Valores medios	32,549	9,593	6,683	9,418	10,243	16,309
PP-2%.P4.F	34,644	10,150	6,520	9,450	11,581	17,903
PP-2%.P5.F	21,558	14,783	7,120	9,425	7,273	11,597
PP-2%.P6.F	28,608	13,062	6,765	9,435	9,333	15,061
Valores medios	28,270	12,665	6,802	9,437	9,396	14,854

Tabla 4.10.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición del 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, después del ensayo a fuego

Las figuras 4.10 y 4.11 muestran los resultados del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adiciones de polipropileno al 1% y 2% en peso del cemento habiendo sido sometidas al ensayo de fuego de manera previa. Las gráficas son análogas en cuanto a su forma y se alcanzan valores de tensiones normales máximas en torno a 30 N/mm². La tensión máxima es mayor en las probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de polipropileno que con el 2% de adición de fibra.

Figura 4.10.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de polipropileno en peso del cemento, después del ensayo a fuego

Figura 4.11.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de fibras de polipropileno en peso del cemento, después del ensayo a fuego

4.4.5.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, después del ensayo a fuego

La tabla 4.11 muestra los valores máximos y últimos de las tensiones, deformaciones y densidades de energía de deformación en probetas de hormigón con adición de fibras metálicas de acero en 1% y 2% en peso de cemento, después de someter a las probetas al ensayo de fuego.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
FA-1%.P4.F	27,980	15,240	7,905	1,049	7,419	13,779
FA-1%.P5.F	29,935	9,616	6,490	9,430	9,141	15,307
FA-1%.P6.F	32,642	8,107	6,360	9,420	9,405	14,961
Valores medios	30,186	10,988	6,918	6,633	8,655	14,682
FA-2%.P4.F	31,231	7,059	6,140	9,440	8,865	15,016
FA-2%.P5.F	22,828	12,481	7,075	9,445	6,717	11,068
FA-2%.P6.F	29,777	9,012	6,845	10,610	8,787	15,837
Valores medios	27,945	9,517	6,687	9,832	8,123	13,974

Tabla 4.11.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de acero en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento, después del ensayo a fuego

Las figuras 4.12 y 4.13 muestran los resultados gráficamente del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, habiendo sido sometidas al ensayo de fuego de manera previa. Las gráficas de la figura 4.12 permiten apreciar que las tensiones máximas alcanzan un valor medio alrededor de 30 N/mm². Las deformaciones máximas en ambos porcentajes de adición son similares, a pesar de la disminución de tensión máxima cuando la adición es del 2% como se observa en la figura 4.13.

Figura 4.12.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de acero en peso del cemento, después del ensayo a fuego

Figura 4.13.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 2% de fibras de acero en peso del cemento, después del ensayo a fuego

4.4.6.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón sin adiciones, después del ensayo a fuego

La tabla 4.12 muestra los valores máximos y últimos de las tensiones, deformaciones y densidades de energía de deformación en probetas de hormigón sin adiciones después de ensayarlas a la exposición térmica del ensayo de fuego.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\varepsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
SA.P4.F	20,192	10,263	5,850	9,990	6,051	12,396
SA.P5.F	19,924	9,567	5,610	9,445	5,741	11,578
SA.P6.F	19,717	10,107	6,210	9,450	5,272	10,542
Valores medios	19,753	10,529	5,950	7,869	5,598	11,577

Tabla 4.12.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón sin adiciones, después del ensayo a fuego

Las figura 4.14 muestra los resultados del ensayo a compresión en probetas de hormigón sin adiciones y previamente sometidas al ensayo a fuego. Las formas de las gráficas son análogas entre sí y se alcanzan valores de tensiones normales máximas próximas a 19 N/mm².

Figura 4.14.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón sin adiciones, después del ensayo a fuego

4.5.- Resultados de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con distintas adiciones y porcentajes

4.5.1.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs)

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en el ensayo a compresión de las probetas de hormigón con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento. La tabla 4.13 muestra los valores de tensión normal máxima, deformación longitudinal máxima y densidad de energía de deformación máxima correspondiente a las tres probetas de hormigón ensayadas a compresión con nanofibras de carbono (CNFs) en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento, así como los valores medios de los mismos.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\varepsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
GF-1%.P1	18,290	7,320	3,305	5,500	3,828	6,792
GF-1%.P2	15,640	6,262	2,830	4,475	2,721	4,533
GF-1%.P3	17,621	7,049	2,950	4,100	2,933	4,694
Valores medios	17,183	6,877	3,020	4,690	3,161	5,340
GF-2%.P1	18,164	7,266	3,475	6,100	4,147	7,412
GF-2%.P2	14,154	5,664	2,845	5,390	2,491	5,026
GF-2%.P3	15,509	6,216	2,72	4,795	2,550	4,903
Valores medios	15,943	6,382	3,013	5,420	3,063	5,781

Tabla 4.13.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento

En las figuras 4.15 y 4.16 se muestran gráficamente los resultados de los ensayos a compresión en las tres probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento.

Figura 4.15.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento

Figura 4.16.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento

4.5.2.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero.

La tabla 4.14 muestra los valores de tensión normal máxima y última, deformación longitudinal máxima y última y densidad de energía de deformación máxima y última correspondiente a las tres probetas de hormigón ensayadas a compresión con adición hibridada de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) y 1% de fibras de acero en peso de cemento, así como los valores medios de los mismos.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\varepsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
GF-FA.P1	15,546	6,223	2,625	4,730	2,516	4,871
GF-FA.P2	16,165	6,473	2,590	4,701	2,618	5,183
GF-FA.P3	14,609	5,852	2,505	4,685	2,210	4,550
Valores medios	15,440	6,183	2,573	4,705	2,448	4,868

Tabla 4.14.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento

La figura 4.17 muestra gráficamente los resultados de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) y 1% fibras de acero en peso de cemento. Según se puede observar, los resultados de las tres probetas muestran valores similares tanto de tensión como de deformación.

Figura 4.17.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero

4.5.3.- Resultados del ensayo de compresión en probetas con adición hibridada de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en el ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento.

La tabla 4.15 muestra los valores de tensión normal máxima, deformación longitudinal máxima y densidad de energía de deformación máxima correspondiente a las tres probetas ensayadas a compresión con 1% de nanofibras de carbono (CNFs) y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento, así como los valores medios de los mismos.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\varepsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
GF-PP.P1	14,550	5,822	2,520	4,505	2,234	4,266
GF-PP.P2	14,418	5,768	2,785	5,695	2,541	5,403
GF-PP.P3	14,526	5,818	2,735	5,710	2,477	5,488
Valores medios	14,498	5,803	2,680	5,303	2,417	5,052

Tabla 4.15.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento

La figura 4.18 muestra a través de la gráfica los resultados de los ensayos a compresión en probetas de hormigón con adición hibridada de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento.

Figura 4.18.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de polipropileno

4.5.4.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de acero

La tabla 4.16 muestra los valores máximos y últimos de las tensiones, deformaciones y densidades de energía de deformación máximas en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
FA-1%.P1	17,852	12,503	4,294	6,000	4,660	7,324
FA-1%.P2	22,573	15,809	4,143	5,725	5,690	8,838
FA-1%.P3	22,840	15,995	4,039	5,500	5,199	8,143
Valores medios	21,088	14,769	4,159	5,742	5,183	8,102
FA-2%.P1	20,510	14,359	3,440	5,226	3,814	6,993
FA-2%.P2	23,968	16,782	4,070	5,689	5,553	8,915
FA-2%.P3	21,501	15,055	4,041E-03	5,972	5,141	8,779
Valores medios	21,993	15,399	2,505	5,629	4,836	8,229

Tabla 4.16.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras acero en peso de cemento

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran los resultados del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento. En las probetas con 1% de adición de fibra de acero, se alcanzan valores de tensiones normales máximas alrededor a 21N/mm² de la misma manera que con el 2% de adición, en cambio el valor medio de la deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " es superior en las probetas con el 1% de adición respecto a las del 2%, alcanzando un valor del doble de deformación. Las gráficas que se muestran son semejantes en cuanto a su forma.

Figura 4.19.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de acero en peso de cemento

Figura 4.20.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de fibras de acero en peso de cemento

4.5.5.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de fibras de polipropileno

En el siguiente apartado se darán los resultados obtenidos a partir del ensayo a compresión en las probetas elaboradas con adición de fibras de polipropileno en 1% y 2% en peso de cemento.

La tabla 4.17 muestra los valores máximos y últimos de las tensiones, deformaciones y densidades de energía de deformación en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento.

	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\max} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
PP-1%.P1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PP-1%.P2	25,826	18,906	4,220	5,450	6,169	9,040
PP-1%.P3	24,275	17,020	4,223	5,285	5,816	8,179
Valores medios	25,051	17,963	4,222	5,368	5,993	8,610
PP-2%.P1	24,642	17,261	4,695	6,349	6,766	10,381
PP-2%.P2	24,355	17,050	4,121	5,450	5,531	8,346
PP-2%.P3	25,802	18,076	4,422	5,657	6,470	9,264
Valores medios	24,933	17,462	4,413	5,819	6,256	9,330

Tabla 4.17.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón con 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento

Las figuras 4.21 y 4.22 muestran los resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento. Como se puede observar, en las probetas con adición de 1% de fibras se alcanzan valores de tensiones normales máximas en torno a 25N/mm². De manera similar ocurre en las probetas con adición del 2% de fibras de polipropileno, todas las gráficas son semejantes, alcanzándose una tensión normal máxima media de aproximadamente 25N/mm². Cabe mencionar, que en la figura 4.21 no aparece el ensayo de la probeta (PP-1%.P1) debido a un resultado anómalo en el ensayo, por tanto, se considera eliminarlo.

Figura 4.21.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento

Figura 4.22.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón con adición del 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento

4.5.6.- Resultados del ensayo de compresión en probetas de hormigón sin adiciones

En el siguiente apartado se darán los resultados obtenidos a partir del ensayo a compresión en las probetas elaboradas con hormigón sin ninguna adición y sin otro ensayo previo en ellas.

La tabla 4.18 muestra los valores de tensión normal máxima, deformación longitudinal máxima y densidad de energía de deformación máxima correspondiente a las tres probetas ensayadas a compresión sin adiciones, así como los valores medios de los mismos.

	$\sigma_{\text{máxima}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{\text{máxima}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\varepsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\text{máxima}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
SA-P1	14,433	10,105	2,943	5,648	2,459	5,762
SA-P2	16,436	11,507	3,468	5,800	3,474	6,801
SA-P3	12,246	8,577	2,940	6,420	2,333	6,088
Valores medios	14,372	10,063	3,117	5,956	2,755	6,217

Tabla 4.18.- Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas de hormigón sin adiciones

En la figura 4.23 se muestran los resultados de los ensayos a compresión en las tres probetas de hormigón realizadas sin adiciones. Como se puede observar, aunque la forma de las gráficas son semejantes, los valores de las tensiones normales máximas oscilan entre 12 y 16 N/mm².

Figura 4.23.- Gráfica tensión/deformación en probetas de hormigón sin adiciones

4.6.- Resultados del ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con distintas adiciones y porcentajes

4.6.1.- Resultados del ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y su hibridación con otras fibras

En la tabla 4.19 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de CNFs y su hibridación con fibras de acero y adición de fibras de polipropileno, realizados de conformidad con la norma ASTM D5334 (2016).

	GF-1%.CT		GF-2%.CT		GF-FA.CT		GF-PP.CT	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Medida 1	2,043	2,445	2,381	2,508	2,585	2,788	2,310	2,519
Medida 2	2,424	2,391	2,326	2,513	2,645	2,843	2,247	2,343
Medida 3	2,038	2,165	2,372	2,573	2,595	2,760	1,959	2,313
Media individual	2,168	2,334	2,360	2,531	2,608	2,797	2,172	2,392
Media	2,251		2,446		2,703		2,282	

Tabla 4.19.- Valores de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de CNFs, con adición hibridada de CNFs con fibras de acero y adición hibridada de CNFs con fibras de polipropileno, a 20°C y 50% de humedad

4.6.2.- Resultados del ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, polipropileno y sin adición

En la tabla 4.20 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, fibras de polipropileno y sin adición, realizados a tenor de la norma ASTM D5334 (2016).

	FA-1%.CT		FA-2%.CT		PP-1%.CT		PP-2%.CT		SA.CT	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Medida 1	3,498	3,613	2,847	2,906	2,242	2,425	2,055	2,268	2,767	2,879
Medida 2	3,394	3,454	2,891	3,043	2,439	2,594	2,235	2,323	2,865	2,802
Medida 3	3,078	3,543	2,933	2,906	2,315	2,376	2,004	2,319	2,544	2,954
Media individual	3,323	3,537	2,890	2,952	2,332	2,465	2,098	2,303	2,725	2,878
Media	3,430		2,921		2,399		2,201		2,802	

Tabla 4.20.- Valores de la conductividad térmica en probetas de hormigón con adición de fibras de acero, adición de fibras de polipropileno y sin adición, a 20°C y 50% de humedad

4.7.- Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En la figura 4.24 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) denominada Scanning Electron Microscope (SEM). Se presentan las imágenes obtenidas en las muestras preparadas mediante corte fresco de probetas de hormigón con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento, así como muestras del hormigón sin adiciones, antes y después de ser sometidas al ensayo a fuego.

Las imágenes de la columna de la izquierda presentan el aspecto textural y morfológico de las muestras en el interior de la matriz de cemento, así como las características más destacadas en su estructura interna. La columna de la derecha correspondiente a cada imagen, muestra el análisis mineralógico en relación a un punto (spectrum) tomado en la muestra de la imagen de la izquierda. En el análisis mineralógico se puede observar la composición química del cemento y las adiciones incorporadas, observando la cantidad de elementos presentes en cada spectrum. La figura 4.24 muestra las imágenes a), b) y c), cada una de ellas con su correspondiente análisis mineralógico. Las imágenes son tomadas a diferentes aumentos con la intención de incorporar el mayor número de detalles. La imagen a) presenta el estudio sobre un hormigón sin adiciones, la imagen b) sobre un hormigón con adición de 1% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento y la imagen c) sobre un hormigón con adición del 2% de nanofibras de carbono (CNFs) en peso de cemento.

Figura 4.24.- Microscopía electrónica de barrido en probetas de hormigón sin adición (a), con adición de 1% de CNFs (b) y adición de 2% de CNFs (c)

Las imágenes del SEM en las muestras de las probetas de hormigón sin adición, con adición de 1% de CNFs y adición del 2% de CNFs en peso de cemento, una vez sometidas al ensayo a fuego, se pueden observar en la figura 4.25 que se muestra a continuación.

Figura 4.25.- Microscopía electrónica de barrido en probetas sin adición (a), con adición de 1% de CNFs (b) y adición de 2% de CNFs (c), después del ensayo a fuego

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.- Consideraciones de partida

El estudio del hormigón, como material estructural, presenta importantes cambios en su comportamiento mecánico cuando se le adiciona otros materiales como son las nanofibras y las fibras. A lo largo del siguiente capítulo, analizaremos los diferentes cambios que experimentan los tipos de hormigón estudiados. Se observa como la adición de fibras y nanofibras con 1% y 2% en peso de cemento modifican el comportamiento del hormigón tradicional, optimizando y en ocasiones empeorando las características del hormigón. En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en los distintos tipos de hormigones estudiados. El comportamiento frente a la acción del fuego, la conductividad térmica, la capacidad resistente a compresión antes y después del ensayo a fuego y la caracterización química y microscópica nos arrojan datos significativos del comportamiento.

5.2.- Análisis del comportamiento en hormigones con adición de CNFs, adición hibridada de CNFs y polipropileno, adición hibridada de CNFs y acero, adición de polipropileno, adición de acero y sin adición, durante el ensayo a fuego

En el siguiente capítulo se evalúa el comportamiento resistente en el hormigón frente a la acción del fuego. Se ha realizado el ensayo de resistencia al fuego directo y real establecido en el Servicio de Bomberos de la Comunidad de Madrid en probetas de hormigón con adición en peso de cemento de CNFs 1%-2%, adición hibridada de CNFs y polipropileno, adición hibridada de CNFs y acero, adición de polipropileno 1%-2%, adición de acero 1%-2% y sin adición.

Se compara el comportamiento en la evolución de la curva paramétrica tiempo-temperatura y la absorción térmica. Estos resultados son estudiados a partir de las mediciones de temperatura obtenidas en la superficie de las probetas de cada grupo estudiado durante el ensayo.

Como se puede apreciar, el ensayo nos arroja datos muy significativos donde las probetas alcanzan la temperatura más elevada a los 10 minutos del inicio del fuego, al tratarse de un incendio totalmente desarrollado. A continuación se analiza el comportamiento de cada tipo de hormigón.

5.2.1.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición de 1% CNFs en peso de cemento durante el ensayo a fuego

Observando la figura 5.1 cabe destacar que la temperatura alcanzada en la zona media y alta de la probeta es prácticamente la misma, sin apenas variaciones de temperatura en la superficie. Esto se debe a la cantidad del 1% de adición de CNFs en peso de cemento incorporado al hormigón, donde una parte del poder calorífico del incendio se emplea en calentar esa proporción de CNFs dispersadas en la masa cementicia, absorbiendo parte de la energía y no transfiriendo el calor a la matriz de cemento. En la parte inferior de la probeta la temperatura alcanzada es mayor, debido a una mayor exposición térmica y al elevado coeficiente de conductividad térmica de las CNFs. Se genera un aumento de temperatura en la zona de mayor exposición a la llama. El hormigón con CNFs al 1% en peso de cemento, posee un comportamiento análogo al hormigón sin adiciones en la fase de enfriamiento, donde el descenso de la temperatura es más acusado y por tanto, el material se convierte en deformable y con fisuración moderada.

Figura 5.1.- Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición de 1% de CNFs, en la zona alta, media y baja de la probeta

5.2.2.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición de 2% CNFs en peso de cemento durante el ensayo a fuego

La figura 5.2 es la que registra los mayores valores de temperatura en toda la probeta, esto es debido a que el aumento asciende al doble de la cantidad de CNFs que se adiciona, provocando una subida de temperatura en la masa del cemento, pues la dispersión de material con mayor conductividad es elevada, y transporta parte de ese calor a la matriz cementicia, por tanto, eleva su temperatura interior de la masa. El elevado grado de temperatura de las probetas con 2% de CNFs se debe al mayor coeficiente de conductividad térmica que posee este material y que debido a su dispersión en la masa del hormigón la probeta aumenta su temperatura de manera conjunta.

Figura 5.2.- Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición de 2% de CNFs, en la zona alta, media y baja de la probeta

5.2.3.- Análisis del comportamiento del hormigón sin adición durante el ensayo a fuego

En la figura 5.3 se muestra el comportamiento del hormigón tradicional frente a la acción del fuego. Se observa cómo varía la temperatura en la superficie de la probeta. Se produce una variación de temperatura de hasta 100 °C de unas zonas a otras de la probeta, apreciándose mayores valores en las partes más expuestas al fuego. Este fenómeno, es debido a la capacidad del hormigón en disipar la temperatura en la superficie del material de manera óptima. Por otro lado, se observa que para aumentar la temperatura interna, es necesario un importante aporte calorífico y durante una exposición prolongada en el tiempo a la acción del fuego. La distribución de las probetas, provoca que el aire del entorno enfríe las mismas, generando en apenas unos centímetros de masa de hormigón notables oscilaciones térmicas. Estas oscilaciones, provoca grandes tensiones internas que se traducen en fisuración. El hormigón sin adición debido a su coeficiente de conductividad térmica hace que la temperatura de descenso sea relativamente rápida y por tanto, el material sea más deformable y produzca una fisuración moderada en la fase de enfriamiento.

Figura 5.3. - Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones sin adición, en la zona alta, media y baja de la probeta

5.2.4.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo del hormigón con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento, durante el ensayo a fuego

En la figura 5.4 se lleva a cabo una comparativa de la evolución de la temperatura respecto del tiempo entre hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento. La medición se realiza en 3 puntos de las probetas, parte alta, media y baja de las mismas. Se puede observar, como los resultados nos revelan que la temperatura alcanzada en las probetas con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, es notablemente mayor debido a la cantidad de adición de CNFs. Dadas las características térmicas de las nanofibras, la conductividad es mayor en el interior del hormigón, elevando su temperatura considerablemente.

Figura 5.4. - Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento, en la zona alta, media y baja de la probeta

5.2.5.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1% en peso de cemento, durante el ensayo a fuego

En la figura 5.5 se compara la evolución de la temperatura respecto del tiempo en hormigones con adición hibridada de CNFs en 1% y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento. Se puede observar, como la temperatura alcanzada en la parte inferior de las probetas es notablemente mayor debido a la mayor exposición al fuego. Es destacado el comportamiento en las zonas media y alta de la probeta con menor exposición, donde el gradiente de temperatura es drástico con respecto a la zona de mayor incidencia al fuego. Se debe a la combinación de las fibras de PP con las CNFs, ambas dos se conjugan para absorber una importante cantidad de calor. Parte del calor del incendio se emplea en fusionar las fibras de PP y otra parte importante en aumentar la temperatura de las nanofibras de carbono.

Figura 5.5. - Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1% en su zona alta, media y baja de la probeta

Dadas las características térmicas de las CNFs y de las fibras de PP la evolución de la temperatura en las probetas en la parte media y alta evoluciona de una manera progresiva con un enfriamiento muy paulatino que revierte en la disminución de fisuras.

5.2.6.- Análisis del comportamiento del hormigón con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en peso de cemento, durante el ensayo a fuego

En la figura 5.6 se lleva a cabo una comparativa de la evolución de la temperatura respecto del tiempo entre hormigones con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en peso de cemento. Dadas las características térmicas de las CNFs y de las fibras de acero la evolución de la temperatura en las probetas en la parte media y alta evoluciona de manera irregular, observándose curvas pronunciadas, con subidas y bajadas de temperatura en el proceso del enfriamiento, provocando mayores retracciones en el hormigón.

Figura 5.6. - Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en su zona alta, media y baja de la probeta

5.2.7.- Comparativa de la evolución de la temperatura media respecto al tiempo en hormigones sin adición, con adición de 1% y 2% de CNFs, con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% y con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1%, durante el ensayo a fuego

La figura 5.7 nos muestra cómo evoluciona la temperatura en función del tiempo en el ensayo a fuego con exposición directa en las probetas sin adición, con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento, con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en peso de cemento y con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1% en peso de cemento. Podemos observar, como se alcanzan valores próximos a los 600 °C en probetas con un 2% de CNFs y valores de 450 °C en las probetas sin adición y el resto de adiciones. Los hormigones con CNFs en 1% en peso del cemento alcanzan valores de menor temperatura y más similares a los alcanzados en hormigones sin adición y con hibridación de fibras, dato a tener en cuenta, pues se trata de una cantidad de adición óptima para no incrementar la conductividad térmica de la probeta debido a la incorporación de las nanofibras.

En la gráfica se muestran incluso valores sensiblemente menores a hormigones sin adición, pues parte del calor es absorbido por las CNFs sin llegar a transmitírsele a la masa de cemento y por ello no se alcanza en el instante una mayor temperatura. Cabe destacar la pérdida de temperatura de las probetas que incorporan adición de CNFs, pues una vez alcanzado el valor máximo de temperatura se produce un decaimiento drástico lo que nos indica que tiene una baja inercia térmica y provocará una mayor retracción de la matriz de hormigón. En cambio, las probetas que incorporan hibridación de fibras, demuestran un comportamiento paulatino en el enfriamiento debido a la mezcla de fibras, confiriendo al hormigón las prestaciones propias de cada tipo de fibra añadida.

Las probetas experimentan gradientes de temperatura diferentes dependiendo de las zonas donde les incide las llamas, de esta manera se puede observar la transferencia de calor del material, así como su capacidad de absorción y disipación del mismo.

Figura 5.7. - Comparativa de la evolución de la temperatura media respecto al tiempo en hormigones sin adición, con adición de 1% y 2% de CNFs, con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% y con adición hibridada de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1%

5.2.8.- Comparativa de la evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones sin adición, con porcentajes del 1% y 2% de fibras de polipropileno y con porcentajes del 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, durante el ensayo a fuego

En el siguiente apartado se compara el comportamiento en la evolución de la temperatura respecto del tiempo en hormigones con adición de fibras de acero en 1% y 2%, con adición de fibras de polipropileno en 1% y 2% y con hormigones nuevamente sin adición para establecer la comparativa. Los ensayos nos revelan como las probetas con FA 1%-2% alcanzan mayores niveles de temperatura en la probeta, pero el aumento se produce de manera gradual tanto en su crecimiento como en el decrecimiento, lo que nos informa de un enfriamiento más paulatino disipando el calor lentamente. Por otro lado nos muestra, que la incorporación de fibras de acero, debido a su elevado coeficiente de conductividad térmica, consigue que el elemento adquiera mayor temperatura con anterioridad.

Las probetas SA frente al efecto del fuego, desarrollan una curva con un aumento de temperatura gradual hasta los 150°C, punto a partir del cual la

pendiente de la curva es más acusada hasta alcanzar la temperatura máxima. El hormigón tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica, lo que permite retrasar el efecto del calor en los primeros minutos y aislando el interior de la masa de hormigón considerablemente. La pérdida de calor decae notablemente en la rama descendente de la curva, lo que provocará tensiones internas que generan fisuraciones importantes.

Por último, mencionar que las probetas con fibras de polipropileno, poseen un comportamiento muy regular frente a la acción del fuego, debido a su coeficiente de conductividad térmica (0,1-0,22). El aumento de temperatura en las probetas es muy progresivo y también en la fase de enfriamiento, siempre con valores inferiores a las probetas con FA y SA. Este calentamiento lento y paulatino así como la fase de decaimiento del incendio permite evitar fisuras en el material, consecuencia del punto de fusión del polipropileno (173°C) que convertirá a la probeta en un material más elástico.

Los daños por incendio son difíciles de precisar, ya que dependen del tiempo de exposición del elemento al fuego, en este caso 1 hora y de la potencia calorífica (40Kg/m²). El hormigón de la estructura, al recibir el calor del fuego, tiende a dilatarse a pesar de su bajo coeficiente de dilatación térmica, provocando retracciones entre el interior de la masa de hormigón y la superficie del mismo.

La figura 5.8 muestra la evolución de la temperatura en función del tiempo en el ensayo a fuego directo, en las probetas sin adición y con distintos tipos y porcentajes de adición (1% y 2%) en peso de cemento. Como se puede observar, las probetas experimentan sus temperaturas más elevadas a los 45 minutos de iniciado el fuego, alcanzando valores próximos a 400°C y siendo la media de la temperatura alcanzada en la superficie del hormigón de 200°C ± 15°C. Las probetas con fibras de acero alcanzan mayor temperatura debido a su elevado coeficiente de conductividad térmica, mientras que los hormigones con fibras de polipropileno son los que alcanzan menor temperatura y de manera más progresiva debido a su menor coeficiente de conductividad térmica y que junto a su punto de fusión (173°C), hace que el material sea más deformable y se produzcan menor cantidad de fisuras en la fase de enfriamiento.

Figura 5.8. - Evolución de la temperatura respecto al tiempo en hormigones sin adición, con adición de fibras de polipropileno en 1% y 2% y hormigón con adición de fibras de acero 1% y 2% en peso de cemento

Hasta 200°C la estructura permanece gris sin experimentar grandes cambios, pero se demuestra que ya está en camino un proceso de cambio en su comportamiento.

En la figura 5.9 se observa una porosidad importante en la superficie del hormigón. El humo del incendio mancha la superficie de la probeta y queda adherida al hormigón superficialmente, apreciándose la fisuración superficial por retracción de manera clara. Se puede apreciar cómo la agresión térmica provoca una degradación y pérdida del revestimiento en forma de desconchado, generando una superficie del hormigón micro-fisurada, con un color grisáceo donde existen pequeñas disgregaciones. En este momento, aunque no hay pérdida de la capacidad mecánica, si se producen cambios en el comportamiento estructural. A medida que el hormigón aumenta de temperatura, el propio humo adherido a la superficie se consume definitivamente, apareciendo un nuevo aspecto del hormigón limpio y gris claro.

Figura 5.9. - Aspecto exterior del hormigón inmediatamente después de un incendio real

En la figura 5.10 se muestran las fotografías de probetas con FA y SA sometidas a una temperatura de 400°C, en este rango de temperatura se estima una pérdida del 10% de su resistencia a compresión. Como puede observarse el hormigón experimenta un cambio de coloración, volviéndose rosáceo debido a la pérdida de las sales de hierro presentes en los áridos (Fernández Cánovas 1994).

El agua libre o capilar incluida en el hormigón empieza a evaporarse a los 100°C, retardando la elevación de temperatura del mismo, gracias al calor latente de vaporización. A los 200°C - 300°C la pérdida de agua capilar es completa sin que se aprecie aún alteración en la estructura del cemento hidratado y sin que las resistencias mecánicas se vean disminuidas considerablemente.

Figura 5.10. - Color gris rosáceo del hormigón después de alcanzar una temperatura de 400 °C

5.3.- Análisis del comportamiento mecánico a compresión del hormigón con adición de CNFs, con hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, con hibridación de CNFs con fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno, con adición de fibras de acero y hormigones sin adición, después de estar sometido al ensayo de fuego

En el siguiente apartado se muestra la evolución de la tensión respecto a la deformación, en hormigones con adición en peso de cemento de CNFs 1%-2%, adición hibridada de CNFs y polipropileno, adición hibridada de CNFs y acero, adición de polipropileno 1%-2%, adición de acero 1%-2% y sin adiciones, después de someter al hormigón al ensayo a fuego directo. Se comparará el comportamiento mecánico de las probetas con diferentes porcentajes de 1% y 2% y misma adición, entre probetas con diferentes adiciones entre ellas y con probetas sin adición. Los datos observados nos permiten analizar las tensiones máximas alcanzadas en relación a las deformaciones máximas y a las densidades de energía de deformación máximas. Por otro lado, se analizará las tensiones últimas en relación a las deformaciones últimas y densidades de energía de deformación últimas.

5.3.1.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigón sin adiciones, antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.11 y 5.12 se muestra el comportamiento de probetas de hormigón con 1% y 2% de CNFs después del ensayo a fuego con un hormigón sin adiciones no expuesto a fuego, observándose un comportamiento muy diferente en las tensiones máximas alcanzadas y en el fenómeno post-cracking.

En la figura 5.11, se observa como las probetas con adición de CNFs en 1% en peso de cemento alcanzan mayores deformaciones y tensiones que un hormigón tradicional, perdiendo cierta ductilidad una vez alcanzadas las tensiones máximas. Dada la importancia de cómo evoluciona la gráfica tensión-deformación en el comportamiento del hormigón, se observa que en el hormigón sin adiciones la gráfica muestra un material más dúctil después del

ensayo a fuego. En cambio, en las probetas con adición de CNFs, la pendiente de las curvas son más pronunciadas, tanto antes como después de las tensiones máximas. El signo más relevante es el aumento de la tensión de la probeta que incorpora CNFs al 1% en peso de cemento, siendo mayor con respecto a un hormigón tradicional y con menor deformación. El material se vuelve tenaz al ser sometido a la agresión térmica, pero a partir de su pico máximo de tensión, decae notablemente, perdiendo ductilidad y volviéndose más frágil.

Figura 5.11. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigón sin adiciones

Sin embargo, como se muestra en la figura 5.12, el comportamiento de las probetas con adición de 2% de CNFs en peso de cemento se comportan de manera análoga al hormigón sin adición no expuesto al incendio, alcanzando tensiones y deformaciones sensiblemente mayores pero con menor pérdida de ductilidad con respecto al hormigón con adición de 1% de CNFs en peso de cemento.

Figura 5.12. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y un hormigón sin adiciones

En la figura 5.13 se compara el comportamiento de probetas de hormigón con 1% de CNFs en peso de cemento con un hormigón sin adiciones después del ensayo a fuego. Se observa un comportamiento similar en ambos grupos de hormigones estudiados. Es claramente apreciable que las tensiones máximas alcanzadas son sensiblemente mayores cuando el hormigón incorpora adición de CNFs en 1% en peso de cemento. Sin embargo, existe una pérdida de la ductilidad en el comportamiento con respecto al hormigón sin adición. La pendiente de la curva en la rama ascendente de la gráfica es análoga en los dos grupos estudiados, marcando la diferencia una vez alcanzada la tensión máxima, donde se observa que la pendiente de la línea descendente es diferente. El cambio de pendiente una vez alcanzada la tensión máxima, nos muestra la ductilidad del material. Por otro lado, es importante destacar que se alcanzan tensiones mayores con menores deformaciones del hormigón cuando adiciona CNFs, esto se traduce en un mejor comportamiento mecánico con respecto al hormigón tradicional.

Figura 5.13. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones sin adición, después del ensayo a fuego

En la figura 5.14 se compara el comportamiento de probetas de hormigón con adición de 2% de CNFs con respecto a un hormigón sin adiciones después del ensayo a fuego, observándose un comportamiento característico en las probetas que incorporan 2% de CNFs. Se puede observar como las tensiones máximas alcanzadas por las probetas de un hormigón sin adiciones son mayores que las que incorpora el hormigón que contiene adición del 2% de CNFs, ello es debido a la conductividad térmica de las CNFs, pues da lugar a un material más conductor del calor y por lo tanto la matriz de cemento se ve perjudicada por la agresión térmica, perdiendo capacidad mecánica y ductilidad.

Figura 5.14. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs y un hormigón sin adiciones después del ensayo a fuego

5.3.2.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento entre sí, antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.15 compara el comportamiento de hormigones con 1% de CNFs antes y después del ensayo a fuego. Se puede observar que la forma de las gráficas de los grupos estudiados es prácticamente la misma en sus pendientes. Existe una diferencia importante y muy destacada en relación a la tensión máxima alcanzada cuando el hormigón con CNFs está sometido al incendio. Como se puede apreciar los valores de la tensión máxima " $\sigma_{\max}$ " alcanzada en el hormigón con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, después del incendio aumenta muy por encima de los valores cuando el material no está sometido al efecto del fuego. El hormigón con CNFs es capaz de mejorar su comportamiento mecánico con la agresión térmica sin apenas aumentar sus deformaciones.

Figura 5.15. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.16 compara el comportamiento de probetas de hormigón con 2% de CNFs antes y después del ensayo a fuego. Se observa que la tensión máxima alcanzada es sensiblemente mayor cuando el hormigón está sometido al incendio, lo que explica nuevamente el buen comportamiento del hormigón con CNFs.

Figura 5.16. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs antes y después del ensayo a fuego

En la figura 5.17 se lleva a cabo con una comparativa entre hormigones con 1% de CNFs y 2% de CNFs después de ser sometidas al ensayo a fuego. Es claramente apreciable que el comportamiento en la evolución tensión-deformación es muy diferente. Las probetas con adición del 1% alcanzan tensiones máximas superiores a las que nos arrojan los hormigones con el 2% de adición de CNFs. Hasta alcanzar la tensión máxima de rotura, las probetas tienen la pendiente de la curva similar, siendo cambiante en la rama descendente donde las probetas con 1% de CNFs pierden ductilidad.

Figura 5.17. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% y 2% de CNFs después del ensayo a fuego

En la figura 5.18 se muestra la fracturación catastrófica de la probeta con 2% de CNFs en peso de cemento. Las grietas son anchas y con profundidad, e incluso en una parte del elemento se observa aplastamiento del propio material, previo al colapso estructural. El tipo de fisura que aparece es paralela a la dirección del eje longitudinal del elemento.

Figura 5.18. - Comportamiento del ensayo a compresión en probetas de hormigón con adición de CNFs después del ensayo a fuego hasta alcanzar la fracturación catastrófica

5.3.3.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.19 compara el comportamiento de probetas de hormigón con 1% de CNFs sometidas al ensayo a fuego y 1% de fibras de PP sin ensayo a fuego, observándose un mejor comportamiento en las probetas que contienen 1% de PP en peso de cemento y que no son sometidas a la acción del fuego. Es destacado, que la ductilidad en ambos grupos de probetas es muy similar a pesar del ensayo a fuego, informándonos que el calor del incendio no modifica el comportamiento dúctil cuando se incorporan fibras de polipropileno.

Figura 5.19. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de polipropileno

La figura 5.20 compara el comportamiento entre hormigones con 2% de CNFs sometidos al ensayo a fuego y 1% de fibras de PP sin ensayo a fuego. Se observa claramente un mejor comportamiento mecánico en hormigones que contienen 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento, que no son sometidas a la acción del fuego. Se alcanzan tensiones máximas muy superiores a los hormigones con adición de 2% de CNFs sometidos al ensayo a fuego. Con respecto a la ductilidad, existe una notable pérdida respecto a los hormigones con adición de CNFs. Las fibras de PP confieren al hormigón un mejor comportamiento mecánico, alcanzado mayores tensiones en igualdad de deformaciones al hormigón con adición de CNFs, sin embargo, el material se vuelve más frágil una vez alcanzada la tensión máxima debido a la pérdida de ductilidad.

Figura 5.20. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de polipropileno

En la figura 5.21 y 5.22 se comparan el comportamiento de hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento con hormigones con 1% de fibras de PP después del ensayo a fuego. Se observa que las tensiones máximas alcanzadas por los hormigones que contienen 1% de PP en peso de cemento superar notablemente la tensión de los hormigones que incorporan 1% y 2% de CNFs en peso de cemento. Un dato relevante en el comportamiento mecánico del hormigón, es la pérdida de ductilidad en los hormigones con adición de fibras de PP, convirtiéndose en un material más frágil una vez alcanzada su tensión máxima.

Figura 5.21. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego

Figura 5.22. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego

La figura 5.23 y 5.24 se comparan el comportamiento a compresión de probetas de hormigón con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento después del ensayo a fuego con probetas de hormigón con 2% de fibras de PP.

Puede observarse, que las probetas con 1% de CNFs en peso de cemento sometidas al ensayo a fuego previo, alcanzan una tensión máxima media inferior a las probetas con 1% de PP no sometidas al incendio. La ductilidad es muy similar en ambos grupos de probetas estudiados antes y después de alcanzar la tensión de rotura. Las pendientes de sus curvas son similares, apreciándose que no tienen un buen comportamiento dúctil.

Figura 5.23. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de polipropileno

Figura 5.24. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de polipropileno

La figura 5.25 y figura 5.26 comparan el comportamiento a compresión de probetas de hormigón con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento con probetas de hormigón con 2% de fibras de PP después del ensayo a fuego.

Se observa un comportamiento muy significativo en las probetas que incorporan adición de fibras de PP después de la agresión térmica en relación a las probetas con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento sometidas al ensayo a fuego. Las gráficas muestran un comportamiento muy dúctil cuando las fibras de PP se fusionan como consecuencia de la temperatura alcanzada en el incendio, consiguiendo elevar su tensión máxima y mantener un buen comportamiento dúctil.

Figura 5.25. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego

Figura 5.26. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de polipropileno después del ensayo a fuego

5.3.4.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.27 y 5.28 comparan el comportamiento a compresión en hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento, después del ensayo a fuego con hormigones con 1% de fibras de acero. La media de las tensiones máximas alcanzadas en las probetas con adición de 1% de CNFs después del incendio es mayor que la conseguida por las probetas que incorporan fibras de acero en 1% en peso de cemento y que no han sido sometidas al ensayo de fuego real. Esto nos indica, que las nanofibras de carbono (CNFs) confieren un buen comportamiento al hormigón de cara a una exposición térmica en estos rangos de temperatura. En cambio, al aumentar del 1% al 2% de adición de CNFs, provoca un cambio en el comportamiento dado que la conductividad térmica del grafeno es elevada, pues las tensiones alcanzadas son menores debido a que el hormigón ha sufrido más el aumento de temperatura en su interior.

Figura 5.27. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de acero

Figura 5.28. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 1% de fibras de acero

La figura 5.29 y 5.30 comparan el comportamiento a compresión de hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento con probetas de hormigón con 1% de fibras de acero después del ensayo a fuego. Los hormigones que incorporan fibras de acero en ambos dos porcentajes estudiados, alcanzan tensiones muy superiores al hormigón con adición de CNFs. Sus gráficas demuestran mayor tenacidad y pérdida de ductilidad debido a la temperatura que se transmite por el interior del hormigón entre las fibras metálicas. Las fibras se vuelven maleables y aguantan mayores deformaciones.

Figura 5.29. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de acero después del ensayo a fuego

Figura 5.30 - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 1% de fibras de acero después del ensayo a fuego

La figura 5.31 y 5.32 comparan el comportamiento a compresión de hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento con hormigones con 2% de fibras de acero después del ensayo a fuego. Al aumentar el porcentaje de fibra de acero en la matriz cementicia lo que se produce es un aumento de la transmisión térmica en el interior de la masa de hormigón, degradándola aún más y por tanto perdiendo capacidad resistente residual después del incendio. Por ello en las gráficas que se muestran a continuación se observan tensiones más similares a las alcanzadas por las probetas que contienen adición de CNFs.

Figura 5.31. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de acero

Figura 5.32. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con 2% de fibras de acero

La figura 5.33 y 5.34 compara el comportamiento a compresión de hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento con hormigones con 2% de fibras de acero después del ensayo a fuego. Al aumentar el porcentaje de fibra de acero en la matriz cementicia lo que provocamos es un aumento de la transmisión térmica en el interior de la masa de hormigón, degradándola aún más y por tanto perdiendo capacidad resistente residual después del incendio. Por ello en las gráficas que se muestran a continuación se observan tensiones más similares a las alcanzadas por las probetas que contienen adición de CNFs.

Figura 5.33. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de acero después del ensayo a fuego

Figura 5.34. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de acero después del ensayo a fuego

5.3.5.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento con hormigones de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.35 y 5.36 comparan el comportamiento a compresión de hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento después del ensayo a fuego con hormigones de adición hibridada de CNFs en 1% en peso de cemento con 1% de fibras de acero e hibridación de CNFs en 1% en peso de cemento con 1% de fibras de polipropileno antes y después del ensayo a fuego.

La figura 5.35 muestra el comportamiento de hormigones con hibridación de CNFs y fibras de PP, sin estar sometidas al incendio. Se demuestra un comportamiento muy regular del hormigón, alcanzando tensiones máximas muy inferiores al hormigón con adición de 1% de CNFs después del fuego. La ductilidad en los hormigones hibridados es muy significativa, siendo muy parecida a la de un hormigón tradicional.

Figura 5.35. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y PP

Observando la comparativa con hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, se aprecia como la tensión máxima es más próxima a los hormigones con adición hibridada, aunque se mantiene con valores superiores.

Con la hibridación se pretende conjugar las características bondadosas que aporta cada tipo de fibra, observándose datos muy característicos

Figura 5.36. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 2% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y PP

En el siguiente apartado se estudia el comportamiento de los hormigones con 1% de CNFs en peso de cemento con hibridación de CNFs con fibras de PP en 1% en peso de cemento después del ensayo a fuego. Podemos observar en la figura 5.37 como el comportamiento varía después de la agresión térmica, alcanzando mayores tensiones y deformaciones máximas. Cuando lo comparamos con las probetas que contienen el 2% de CNFs en la figura 5.38 observamos como los valores son incluso superiores, dado que se ponen de manifiesto las características propias de las nanofibras y de las fibras.

Figura 5.37. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y PP después del ensayo a fuego

Figura 5.38. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 2% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y PP después del ensayo a fuego

5.3.6.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento con hormigones de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

La figura 5.39 y 5.40 muestran el comportamiento de hormigones con hibridación de 1% de CNFs y fibras de acero en 1% en peso de cemento sin estar sometidos al incendio con hormigones con 1% y 2% de CNFs después del ensayo a fuego. Como ocurre en la hibridación con fibras de PP, el comportamiento de la hibridación con fibras de acero es también muy regular, alcanzando tensiones máximas muy inferiores a las probetas con adición de 1% y 2% de CNFs después del fuego. Sin embargo, la ductilidad en las probetas hibridadas con fibras de acero es menor en relación a la hibridación con fibras de PP.

Figura 5.39 - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y acero

Figura 5.40. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs después del ensayo a fuego y hormigones con hibridación de CNFs y acero

La figura 5.41 y 5.42 muestran el comportamiento de hormigones con hibridación de 1% de CNFs y fibras de acero en 1% en peso de cemento en comparación con hormigones con 1% y 2% de CNFs después del ensayo a fuego. Como ocurre en la hibridación con fibras de PP, el comportamiento de la hibridación con fibras de acero es también muy regular, alcanzando tensiones máximas inferiores a los hormigones con adición de 1% de CNFs. Las gráficas con 2% de CNFs son más similares a las gráficas obtenidas en la hibridación debido a la combinación de características.

Figura 5.41. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y acero después del ensayo a fuego

Figura 5.42. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre probetas con 2% de CNFs y hormigones con hibridación de CNFs y acero después del ensayo a fuego

En la figura 5.43 se muestra el comportamiento de una probeta ensayándose a compresión después de una agresión térmica previa. Como puede apreciarse, la rotura de la misma comienza por las microfisuras ya existentes en el ensayo a fuego. La presencia del humo adherido al hormigón durante el incendio (partículas sólidas), permite analizar minuciosamente el trayecto de la fisura marcada y su profundidad, demostrando una fisuración por retracción.

Figura 5.43. - Comportamiento del ensayo a compresión en probetas de hormigón con hibridación de CNFs y fibras de acero después del ensayo a fuego

La figura 5.44 muestra el aumento de resistencia en tanto por ciento (%) de los hormigones con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno e hibridación de CNFs con fibras de acero respecto a los hormigones sin adición como elemento de referencia en las comparativas, después del ensayo a fuego.

A partir de la comparativa, se muestra la pérdida o aumento entre las diferentes comparativas llevadas a cabo. Se trata de una gráfica de barras en tanto por ciento (%) donde se relaciona la tensión máxima alcanzada por cada tipo de hormigón estudiado en relación con un hormigón sin adición no sometido a fuego, donde de una manera más rápida se facilita una información muy directa y concreta.

Como punto de partida hay que mencionar que la tensión máxima alcanzada “ σ_{max} ” por todos los tipos de hormigones estudiados, después del ensayo a fuego, supone una mejora con respecto al hormigón tradicional de referencia.

De la misma manera, la deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " y energía máxima " $E_{\max}$ " dan valores superiores en los hormigones con adiciones, después del ensayo a fuego.

El efecto del fuego en el hormigón lo convierte en un material más tenaz después de la agresión térmica, y por ello las tensiones alcanzadas son mayores. Este fenómeno provoca otras desventajas en el hormigón como la pérdida de ductilidad y la fragilidad una vez alcanzada la tensión máxima " $\sigma_{\max}$ ". Estas pérdidas pueden verse compensadas con la incorporación de fibras y/o nanofibras.

Los hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento después del ensayo a fuego, mejoran sensiblemente su resistencia en relación a un hormigón sin adición a temperatura ambiente. Cabe destacar que la incorporación al hormigón de CNFs al 2%, provoca un peor comportamiento con respecto al hormigón sin adiciones después del ensayo a fuego, ello es debido a la conductividad térmica de las CNFs diseminadas en el hormigón.

Cuando analizamos los hormigones con hibridación de CNFs y fibras de acero e hibridación de CNFs y fibras de polipropileno después del ensayo a fuego, se puede observar como las tensiones son levemente mayores con respecto al hormigón sin adición a temperatura ambiente. Los valores son semejantes a los resultados obtenidos a los hormigones con adición de CNFs.

Señalar, como datos más característicos y con mayor carga de información, el aumento de resistencia con valores sobresalientes en hormigones con adición de PP-1% y PP-2% y de FA-1% y FA-2% sometidas a fuego con respecto a hormigones sin adición en condiciones normales de temperatura.

Por tanto, concluir que las CNFs después del ensayo a fuego mejoran el comportamiento mecánico del hormigón. La hibridación no supone una gran ventaja en el comportamiento mecánico del hormigón después del ensayo a fuego. Hay que estacar que las ventajas realmente en el comportamiento mecánico del hormigón después de una agresión térmica, son alcanzadas con la adición de fibras de polipropileno y fibras de acero.

Figura 5.44. - Pérdidas y aumentos de resistencia en tanto por ciento en hormigones con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego

5.4.- Análisis del comportamiento de la conductividad térmica en hormigones con adición de CNFs, con adición hibridada de CNFs y polipropileno, con adición hibridada de CNFs y acero, con adición de polipropileno, con adición de acero y hormigones sin adición

En este apartado se ha determinado la conductividad térmica (W/mK) de hormigones con diferentes tipos de adición. Se compara la conductividad térmica (λ) midiendo la capacidad de conducción del calor mediante el ensayo de medida de la conductividad térmica a 20°C y 50% de humedad relativa en probetas cúbicas de hormigones con adición de nanofibras de carbono (CNFs) en 1% y 2% en peso de cemento, fibras de polipropileno (PP) en 1% y 2% en peso de cemento y fibras de acero en 1% y 2% en peso de cemento, hibridación de 1% de CNFs con 1% de fibras de polipropileno e hibridación 1% de CNFs con 1% de fibras de acero y hormigones sin adición.

La figura 5.45 muestra los resultados de la conductividad térmica en probetas cúbicas estudiadas en las condiciones indicadas en el ensayo de conductividad térmica según la norma ASTM D5334.

La incorporación de nanofibras de carbono (CNFs) en el hormigón disminuye el coeficiente de conductividad térmica respecto a un hormigón sin adiciones. Destacar que incorporar un tipo de adición con un nano material modifica el comportamiento de la conductividad térmica en el hormigón, siendo más elevado con mayor adición de nanofibra incorporada a la matriz. Cuando el hormigón contiene un 1% de CNFs en peso de cemento, disminuye la conductividad térmica del compuesto, debido a que parte del flujo de calor se emplea en aumentar la temperatura de la nanofibra diseminada, no pasando el flujo de calor a la matriz cementicia. Sin embargo, cuando el porcentaje es del 2% de CNFs, la presencia de más nanofibra eleva la temperatura de la propia masa del hormigón dada la buena conductividad térmica del grafeno.

Cuando nos centramos en hormigones con hibridación de fibras, podemos observar que se fusionan las características propias de la fibras mezcladas. El hormigón que contiene como adición híbrida de CNFs en 1% en peso de cemento y 1% de polipropileno, nos revela una conductividad térmica aproximada a la de las probetas que contienen 1% de fibras de PP y 1% de CNFs, situando su valor entre ambas. De la misma manera ocurre cuando la hibridación es de CNFs en 1% en peso de cemento y 1% de fibras de acero, el resultado está comprendido entre ambos dos valores, inclinándose más del lado de la conductividad térmica de las probetas con 1% de CNFs. Este dato es muy significativo, pues este tipo de adición híbrida nos permite aunar las prestaciones de cada fibra en un elemento único, pudiendo diseñarlo según las necesidades existentes.

Como puede observarse en hormigones con 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, los elementos que incorporan fibras PP tienen un menor coeficiente de conductividad térmica en comparación con el hormigón tradicional, debido a la baja conductividad térmica de la propia fibra de polipropileno. Cabe destacar, que disminuye el coeficiente de conductividad térmica cuando hay mayor porcentaje de fibra de polipropileno, ello es debido, al aumento de fibra de PP.

En cuanto a los resultados de la conductividad térmica en muestras de hormigón con adición de fibras de acero, se aprecia claramente que se eleva

su coeficiente de conductividad térmica con respecto al hormigón tradicional sin adiciones, siendo más elevado cuando se utiliza adición al 1% de fibras de acero que con un 2% de adición. Esto es debido nuevamente a la propiedad de la saturación de cemento, que permite que se eleve la temperatura de manera notable en el hormigón sin adiciones y con menor cantidad de fibras. Si el hormigón contiene en su interior un 2% de fibras de acero, la propia fibra es capaz de absorber el calor por conducción nos transmitiéndoselo a la matriz cementicia y por tanto, no elevando el coeficiente de conductividad térmica del compuesto.

En la fig. 5.45 Se muestra una comparativa de la conductividad térmica de los diferentes hormigones estudiados. En ella se observa como la menor conductividad térmica es la del hormigón que contiene un 2% en peso de cemento de fibras de PP. El lugar con mayor coeficiente de conductividad térmica lo ocupa el hormigón con 1% de adición de fibra de acero. Un dato destacado es el comportamiento entre las adiciones de fibras y de las nanofibras. Cuando aumentamos el porcentaje de fibra en el hormigón con acero o polipropileno, se observa que disminuye la conductividad térmica. En cambio, incorporar el doble de nanofibra de carbono en el hormigón provoca el efecto contrario en la conductividad, ello es debido, a la buena diseminación de una material en escala nano, formando parte de la matriz de cemento de una manera más integrada. Cuando nos referimos a hormigones hibridados entre fibras y nanofibras, se observa que se tiende a un equilibrio en los comportamientos anteriorente mencionados, dando un resultado más equilibrado.

Si comparamos como evoluciona la conductividad térmica con respecto a un hormigón tradicional de referencia, los datos en tanto por ciento son relevantes. En el hormigón con adición de fibras de acero (1%-2%) aumenta la conductividad térmica un 13% respecto del hormigón convencional, en el caso del PP, la conductividad térmica disminuye un 18%. Cuando lo comparamos con la adición de CNFs, la conductividad térmica disminuye un 16% con respecto al hormigón de referencia, con hibridación de GF-PP disminuye un 18% y con respecto a la hibridación de GF-FA disminuye un 3,4%.

En resumen, la incorporación de fibras contribuye a elegir las condiciones de transferencia de calor dentro del hormigón, colaboran reduciendo o aumentando la conductividad térmica del material. Dependiendo de las necesidades existentes en el diseño, aumentan o disminuyen su

comportamiento frente al paso de calor por el material. Este comportamiento elegido, se traduce en minimizar el efecto dilatación-retracción del hormigón cuando lo deseemos, evitando así el agrietamiento del hormigón y retrasando la propagación de temperatura dentro del elemento estructural, así como alcanzar una mejora del efecto “spalling” en el hormigón.

Figura 5.45. - Comparativa de la conductividad térmica de probetas cúbicas de hormigón con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero y hormigones sin adición

5.4.1.- Análisis estadístico del ensayo de la conductividad térmica en hormigones con adición de CNFs, con adición hibridada de CNFs y polipropileno y con adición hibridada de CNFs y acero

El presente estudio pretende detectar diferencias estadísticamente significativas en la conductividad térmica de probetas de hormigón confeccionadas con distintos tipos de fibras, utilizadas como adición.

Para ello han sido confeccionadas dos series de probetas cúbicas de hormigón con adición de nanofibras de carbono (CNFs) en una proporción de 1% y del

2% en peso de cemento, así como otras dos series de probetas con adiciones híbridas, una con CNFs (1%) y fibras de polipropileno (1%) y otra con CNFs (1%) y fibras de acero (1%).

Con el fin de detectar las posibles diferencias en la conductividad que presentan las probetas ejecutadas con los diferentes tipos de fibras y su proporción, se ha llevado a cabo un análisis de la varianza simple (One way ANOVA).

5.4.2.- Análisis del efecto de las diferentes adiciones en el hormigón sobre la conductividad térmica con humedad relativa 50%

En un análisis previo del diagrama de medias (figura 5.46) es posible observar como los intervalos de confianza de los tres tipos de adiciones tienen un desarrollo dentro de rangos muy diferentes. A priori es posible descartar la existencia de diferencias entre las probetas amasadas con una adición del 1% de CNFs y las amasadas con CNFs y fibras de polipropileno. Pero parece

pre

Figura 5.46. - Comparación de valores medios de la conductividad térmica (W/mK) en hormigones con adición de 1% de CNFs (GF_1) y del 2% (GF_2), con adición de fibras híbridadas de 1%CNFs y 1% de acero (GF-FA) y con adición de fibras híbridadas CNFs y polipropileno (GF-PP), para una humedad relativa del 50%.

La tabla 5.1 del análisis de la varianza muestra que existen diferencias significativas, puesto que el valor-P de la razón-F es menor que 0,05, entre la

media de conductividad térmica entre los distintos niveles de adiciones de fibras en los hormigones con un nivel de confianza del 95,0%.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,769209	3	0,256403	11,20	0,0002
Intra grupos	0,45797	20	0,0228985		
Total (correlación)	1,22718	23			

Tabla 5.1. - ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) en hormigones con adición de 1% de CNFs (GF_1) y del 2% (GF_2), con adición de fibras híbridadas de 1%CNFs y 1% de acero (GF-FA) y con adición de fibras híbridadas CNFs y polipropileno (GF-PP), para una humedad relativa del 50%

En la tabla 5.2 se muestra la prueba de rangos múltiples que permite determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, mediante la prueba LDS de Fisher, indicando la diferencia que existe entre sus medias comparadas dos a dos. El análisis arroja la existencia de diferencias con significancia estadística (indicadas con un asterisco *) en la conductividad térmica del hormigón entre las probetas con adición de CNFs en ambas concentraciones (1% y 2%), entre las que contienen 1% de CNFs y las amasadas híbridadas con CNFs y fibras de acero y entre las que contienen 2% de CNFs y las amasadas híbridadas con CNFs y fibras de acero. Por último también existen diferencias estadísticamente significativas entre los hormigones híbridos de CNFs y polipropileno y los hormigones híbridos de CNFs y acero. Todos ellos con un nivel de confianza del 95%. En la parte superior de la tabla se muestran la homogeneidad entre parejas de probetas según la alineación de las X's en columnas.

Adición	Casos	Media	Grupos Homogéneos
GF_PP	6	2,251	X
GF_2	6	2,28183	XX
GF_1	6	2,4455	X
GF_FA	6	2,70267	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
GF_1 - GF_2	*	-0,1945	0,182243
GF_1 - GF_FA	*	-0,451667	0,182243
GF_1 - GF_PP		-0,0308333	0,182243
GF_2 - GF_FA	*	-0,257167	0,182243
GF_2 - GF_PP		0,163667	0,182243
GF_FA - GF_PP	*	0,420833	0,182243

* Indica una diferencia significativa.

Tabla 5.2. - Prueba de rangos múltiples para la conductividad (W/mK) en hormigones con adición de 1% de CNFs (GF_1) y del 2% (GF_2), con adición de fibras híbridadas de 1%CNFs y 1% de acero (GF-FA) y con adición de fibras híbridadas CNFs y polipropileno (GF-PP), para una humedad relativa del 50%.

Por tanto, es posible concluir que, con los datos obtenidos de las probetas ensayadas con distintas adiciones de fibras simples o híbridadas, es posible detectar diferencias significativas entre todas ellas a excepción de los pares CNFs (en ambas proporciones) y fibras híbridadas de CNFs-polipropileno.

5.4.3.- Análisis estadístico del ensayo de la conductividad térmica en hormigones con adición de fibras de acero, con adición de fibras de polipropileno y hormigones sin adición

El presente estudio pretende detectar diferencias estadísticamente significativas en la conductividad térmica de hormigones con diferentes tipos de adición.

Para ello han sido confeccionadas dos series de probetas cúbicas de hormigón con adición de fibras de polipropileno en una proporción de 1% y del 2% en

peso de cemento, otras dos series con adición de fibras de acero en una proporción de 1% y del 2% en peso de cemento y dos series de probetas de hormigón sin adiciones.

Con el fin de detectar las posibles diferencias en la conductividad que presentan las probetas ejecutadas con los diferentes tipos de fibras y su proporción, se ha llevado a cabo un análisis de la varianza simple (One way ANOVA), comparando dos a dos el comportamiento de cada una de las adiciones de fibra a la probeta patrón

En la tabla 5.3. se muestran los valores obtenidos del ensayo de la conductividad térmica en los grupos estudiados. Se procede a realizar la media individual de cada probeta y la media de cada serie.

	FA-1%.CT		FA-2%.CT		PP-1%.CT		PP-2%.CT		SA.CT	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Medida 1	3,498	3,613	2,847	2,906	2,242	2,425	2,055	2,268	2,767	2,879
Medida 2	3,394	3,454	2,891	3,043	2,439	2,594	2,235	2,323	2,865	2,802
Medida 3	3,078	3,543	2,933	2,906	2,315	2,376	2,004	2,319	2,544	2,954
Media individual	3,323	3,537	2,890	2,952	2,332	2,465	2,098	2,303	2,725	2,878
Media	3,430		2,921		2,399		2,201		2,802	

Tabla 5.3. - Valores de la conductividad térmica en hormigones con adición de 1%-2% de fibras de acero, con adición de 1%-2% de polipropileno y sin adición, a 20°C y 50% de humedad

5.4.3.1- Estudio del efecto de la adición de fibras de acero en 1% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón

Si se analiza el comportamiento de las probetas ensayadas a las que se han incorporado fibras de acero en un porcentaje de 1% en peso de cemento, en un análisis previo del diagrama de medias (figura 5.47), es posible observar como apenas existe solape entre los intervalos de confianza de ambos experimentos, por lo que se descarta la posible interacción entre ambos.

Figura 5.47. - Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de acero en peso de cemento (FA_1)

En la tabla 5.4 del análisis de la varianza se puede observar como el valor-P de la prueba de la F es menor a 0,05, por lo que se puede afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de conductividad térmica entre ambos tipos de hormigones ensayados, con un nivel de confianza del 95%.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,18252	1	1,18252	42,64	0,0001
Intra grupos	0,27735	10	0,02773		
Total (correlación)	1,45988	11			

Tabla 5.4. - ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de acero en peso de cemento (FA_1)

Por tanto es posible concluir que los hormigones ensayados con adición de fibras de acero en una proporción del 1% en peso de cemento, presentan valores de conductividad térmica significativamente superiores a las de los hormigones que no contienen adición.

5.4.3.2- Estudio del efecto de la adición de fibras de acero en 2% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón

Este análisis comprueba las diferencias en la conductividad que presentan los hormigones sin adición y los hormigones con adición de fibra de acero en una concentración del 2% en peso de cemento. Si comparamos las medias de

ambos ensayos (figura 5.48), se puede apreciar que los intervalos de confianza tienen parte de su recorrido en común, por lo que a pesar de que los resultados de conductividad térmica obtenida en los hormigones con adición de fibra de acero en una concentración del 2% en peso de cemento son mayores, la diferencia entre los valores de ambos experimentos no parece ser

Figura 5.48. - Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de acero en peso de cemento (FA_2)

La tabla 5.5 del análisis de la varianza muestra que efectivamente no existen diferencias significativas, puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de conductividad térmica entre un nivel de hormigón y otro, con un nivel de confianza del 95%.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,042602	1	0,0426021	3,47	0,0919
Intra grupos	0,122645	10	0,0122645		
Total (correlación)	0,165247	11			

Tabla 5.5. - ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de acero en peso de cemento (FA_2)

5.4.3.3- Estudio del efecto de la adición de fibras de polipropileno en 1% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón

Analizando la influencia que tiene en la conductividad térmica la adición de fibras de polipropileno en el hormigón en una concentración del 1% en peso de cemento, se puede observar en la figura 5.49, como los intervalos de confianza de ambos experimentos presentan desarrollo en distintos valores sin existir

Figura 5.49. - Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_1)

Si se realiza una análisis de la varianza para detectar diferencias significativas entre ambos ensayos de conductividad, el P-valor de la prueba de la F tiene un valor inferior a 0,05, por lo que se puede afirmar que los valores de conductividad de los hormigones con adición de fibra de polipropileno en una concentración del 1% en peso de cemento son inferiores, con una significación estadística para un nivel del confianza del 95% (tabla 5.6).

Fuente	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,488033	1	0,488033	28,16	0,0003
Intra grupos	0,173324	10	0,017332		
Total (correlación)	0,661358	11			

Tabla 5.6. - ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 1% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_1)

5.4.3.4- Estudio del efecto de la adición de fibras de polipropileno en 2% en peso de cemento sobre la conductividad térmica del hormigón

Si se analiza la relación que existe entre la conductividad de la adición de fibras de polipropileno en el hormigón en una concentración del 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, se observa en el diagrama de medias (figura 5.50) que existen diferencias en los intervalos de confianza de ambos ensayos, obteniéndose valores significativamente inferiores en los hormigones

Figura 5.50. - Comparación de valores medios de conductividad térmica (W/mK) en hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_2)

Los valores obtenidos en la tabla 5.7 del análisis de la varianza, muestran un P-valor de la prueba de la F con un valor 0, lo que indica que los resultados de los ensayos de conductividad realizados en los dos tipos de hormigones son significativamente diferentes para un nivel de confianza del 95%.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,08420	1	1,0842	55,50	0,0000
Intra grupos	0,19536	10	0,0195		
Total (correlación)	1,27957	11			

Tabla 5.7.- ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) por hormigones sin adición (SA) y hormigones con 2% de fibra de polipropileno en peso de cemento (PP_2)

De los análisis de la varianza sencilla que se han realizado comparando cada una de las adiciones de fibras con sus distintas proporciones, es posible concluir que los valores de conductividad térmica obtenidos en los hormigones con adición de fibra de acero son superiores a los de los hormigones sin adición, pero solo los que tienen una proporción en peso de cemento del 1% presentan diferencias estadísticamente significativas. Por el contrario, los hormigones con adición de fibras de polipropileno ofrecen valores de conductividad significativamente inferiores con ambas proporciones de adición.

A fin de conocer si existe dependencia entre el tipo de fibra con el que se ha reforzado el hormigón y su concentración, en la conductividad media de la fibra, es posible realizar un diseño factorial replicado dos veces. De cada una de las amasadas realizadas en el experimento se han realizado 3 probetas, constituyentes de una serie. A su vez se ha realizado dos series de cada una de los tipos de fibra y proporción, lo que permite obtener los resultados medios de cada una de las series y utilizar los dos valores medios de cada tipo de probeta como datos independientes en el análisis factorial. La variable dependiente del análisis factorial es la conductividad térmica y los factores son el tipo de fibra y la proporción de la misma en el hormigón. .

La tabla 5.8 del análisis de la varianza descompone la variabilidad de la conductividad térmica en contribuciones debidas a los dos factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la conductividad térmica con un 95,0% de nivel de confianza.

El análisis de la varianza del experimento multifactorial vuelve a poner en manifiesto la existencia de diferencias significativas entre los hormigones elaborados con distintas fibras y las diferencias entre las distintas proporciones de las mismas, pero descarta la diferencia significativa en la interacción de ambos factores.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tipo de fibra	1,53475	1	1,534750	112,28	0,0004
B:Proporción	0,24992	1	0,249924	18,280	0,0129
INTERACCIONES					
AB	0,04836	1	0,0483605	3,540	0,1331
RESIDUOS	0,054677	4	0,0136693		
Total (corregido)	1,887710	7			

Tabla 5.8. - ANOVA para la conductividad térmica (W/mK) con dos factores: tipo de fibra y proporción de la misma

Por lo tanto, el cambio que produce la proporción de fibras en la conductividad no depende del tipo de fibra. De la misma manera que el cambio que produce el tipo de fibra en la conductividad no depende de la proporción de la misma.

Este hecho se puede observar en el gráfico de interacciones (Figura 5.51), donde las dos rectas no se cruzan presentado un comportamiento muy parecido.

Figura 5.51. - Gráfico de interacciones entre la conductividad térmica (W/mK) de hormigones con distintos porcentajes de fibras de acero y fibras de polipropileno

5.5.- Análisis del comportamiento mecánico a compresión del hormigón con adición de CNFs, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero y hormigones sin adición

En el presente capítulo se compara el comportamiento en los ensayos a compresión de las probetas de hormigón con sus diferentes porcentajes de CNFs entre sí, con respecto a hormigones con otro tipo de adición y respecto a los hormigones sin adiciones.

Los resultados obtenidos en el ensayo a compresión del hormigón a temperatura ambiente se muestran a continuación en el capítulo, mediante el gráfico más representativo de cada caso, mostrando la evolución de la tensión respecto a la deformación, en hormigones sin adición y hormigones con distintos tipos y porcentajes de adición en peso de cemento.

Las gráficas responden a un comportamiento del material cuando las probetas están sometidas a un esfuerzo de compresión. La primera zona de la gráfica se corresponde a la rama ascendente de la parábola, encontrándonos en el estado elástico, si se observa pendiente suave esto nos indica ductilidad, en cambio, si la pendiente es pronunciada nos informa de material frágil. Continúa una segunda zona que finaliza en el punto de máxima resistencia de la muestra donde aparecerán las microfisuras en la propia probeta, correspondiente con un periodo de fluencia (rama no elástica). Cuando se alcanza el valor de la tensión máxima y por tanto la rotura real de la probeta (fracturación catastrófica), cambia la curvatura de la parábola donde se observa un descenso de la resistencia hasta llegar a la falla total del testigo (resistencia residual). En esta zona la deformación unitaria alcanza el valor de la deformación de la zona correspondiente a la rama no elástica. Cuando la pendiente de la rama descendente es suave, también nos indica ductilidad del material, lo que se traduce en aviso previo al colapso estructural.

5.5.1.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento entre sí

La figura 5.52 compara el comportamiento de los hormigones con 1% y 2% de CNFs entre sí. Según se puede observar, el comportamiento en la resistencia a compresión entre hormigones con ambos porcentajes marca una diferencia entre ellos, dando lugar a gráficas diferentes. La tensión máxima " $\sigma_{\max}$ " de los hormigones con 1% de CNFs es sensiblemente mayor respecto a los hormigones con 2% de CNFs. El valor medio de la tensión de los hormigones que incorporan adición de CNFs en 1% en peso de cemento, supera la de los hormigones que incorporan un 2% de CNFs. La deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " es menor cuando el hormigón tiene 1% de CNFs debido a su mayor resistencia. La densidad de energía de deformación máxima " $E_{\max}$ " alcanza valores sensiblemente superiores en los hormigones con 2% de CNFs como consecuencia del aumento de su ductilidad.

Figura 5.52. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con 1% y 2% de CNFs entre si

En la figura 5.53 se observa la rotura por exceso de compresión en hormigones con adición de CNFs. Se manifiestan en primera instancia microfisuras paralelas a la dirección de la sollicitación axial, disminuyendo la altura de la probeta según avanza el ensayo, debido a la sollicitación de compresión aplicada (ΔL). El aumento continuo de la carga hace que las fisuras se intensifiquen, ampliando su longitud y profundidad, mostrándose una fisura

vertical de pre-rotura, donde la probeta queda totalmente seccionada, pasando a un aspecto de destrucción total después del colapso.

Figura 5.53. - Sintomatología del ensayo a compresión en probetas de hormigón con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento

5.5.2.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones sin adición

A continuación se comparan los ensayos de resistencia a compresión de las probetas de hormigón sin adiciones con las probetas de hormigón que tienen adición de CNFs en 1% y en 2% en peso de cemento.

Las figuras 5.54 y 5.55 relacionan el comportamiento de hormigones sin adición con hormigones que contienen un 1% y 2% de CNFs en peso de cemento, respectivamente. Como se puede observar, con ambos porcentajes de adición, la tensión máxima es mucho mayor en hormigones con CNFs frente a hormigones sin adición. Es destacado como la pendiente de la recta es mayor en la rama descendente de la curva en hormigones con CNFs una vez que se alcanza la tensión máxima. La pendiente pronunciada indica pérdida de ductilidad. Los hormigones sin adición tienen una curva más suave con respecto a hormigones con adición de CNFs, lo que nos indica un mejor comportamiento dúctil.

Figura 5.54. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones sin adición

En la figura 5.55 se muestra como los hormigones con el 2% de adición de CNFs suavizan la rama descendente respecto a hormigones con 1% de adición de CNFs, lo que se traduce en una mejora de la ductilidad. Muestran una curva similar a hormigones sin adición, esto permite demostrar que el aumento de CNFs convierte al hormigón en más dúctil.

Figura 5.55. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones sin adición

En la figura 5.56 aparece una rotura por exceso de compresión de una probeta de hormigón con adición del 2% de CNFs en peso de cemento. Como se puede observar, el elemento se secciona verticalmente, el hormigón se fisura en su totalidad, se producen desconchados y astillamientos hasta el aplastamiento del material por completo. El esfuerzo de la probeta de hormigón es tan elevado, que provoca el pandeo en la probeta y un agrietamiento generalizado. El fallo sucede por compresión, el hormigón se destruye y la probeta se abomba, resultando una rotura satisfactoria en la probeta cilíndrica (UNE-EN 12390-2:2009).

Figura 5.56. - Comportamiento de rotura satisfactoria a compresión en probetas de hormigón con 2% de CNFs en peso de cemento

5.5.3.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento

En el presente capítulo se compara el comportamiento en los ensayos a compresión de las probetas de hormigón con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento respecto a las probetas que incorporan adición de fibras de polipropileno en 1% y en 2% en peso de cemento.

La figura 5.57 y 5.58 comparan el comportamiento de hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento respectivamente, con hormigones

con adición de 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento. Como se puede observar, el comportamiento en la resistencia a compresión en hormigones con adición de CNFs con ambos porcentajes es muy similar, en comparación con los valores alcanzados por los hormigones con 1% de adición de fibras de PP. Los valores en la tensión máxima " $\sigma_{\max}$ " alcanzados son muy superiores cuando la adición es de PP respecto a los hormigones con 1% y 2% de CNFs en peso de cemento. La densidad de energía de deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " también se ve incrementada notablemente, así como la energía máxima " $E_{\max}$ ". En cambio, la ductilidad es mantenida por los hormigones con adición de CNFs respecto al hormigón con adición de PP, pues la pendiente de la curva es mucho más acentuada en las gráficas correspondientes al hormigón con polipropileno.

Figura 5.57. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de polipropileno

En la figura 5.58 se observa con claridad como la curva de la rama descendente en hormigones con 2% de CNFs es muy suavizada con respecto al hormigón con 1% de fibras de PP, demostrando que el hormigón con adición de CNFs se comporta con mejor ductilidad.

Figura 5.58. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de polipropileno

Las figuras 5.59 y 5.60 comparan el comportamiento entre hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento con hormigones con adición de 2% de fibras de polipropileno, respectivamente. Se observa un comportamiento muy similar en la resistencia a compresión entre hormigones con 1% y 2% de adición de CNFs con respecto a hormigones con 2% de fibras de PP en peso de cemento.

El hormigón con adición de CNFs en ambos porcentajes estudiados, alcanza valores inferiores de tensión máxima " $\sigma_{\max}$ ", respecto a los hormigones con adición de 2% de fibras de polipropileno. La densidad de energía de deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " también alcanza valores inferiores, así como, la energía máxima " $E_{\max}$ ". Sin embargo, la ductilidad es muy similar, pues sus pendientes son prácticamente las mismas en los grupos estudiados.

Figura 5.59. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de polipropileno

En la figura 5.60 se observa como las pendientes son parecidas en los hormigones estudiados, este dato revela la importancia que tiene la incorporación de las fibras, mejorando considerablemente la ductilidad.

Figura 5.60. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de polipropileno

5.5.4.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento

En el presente capítulo se compara el comportamiento en los ensayos a compresión de las probetas de hormigón con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento respecto a las probetas de hormigón con adición de fibras de acero en 1% y en 2% en peso de cemento.

En la figura 5.61 se compara el comportamiento de la resistencia a compresión entre las probetas de hormigón que incorporan 1% de fibras de acero y 1% de CNFs, pudiéndose observar cómo el comportamiento entre hormigones con este tipo de adiciones es diferente.

Centrándonos en la figura 5.61, cabe mencionar que la tensión máxima " σ_{max} " es mayor en los hormigones con 1% de FA frente a los hormigones con 1% de adición de CNFs en peso de cemento. Por otro lado, la deformación máxima " ϵ_{max} " y energía máxima " E_{max} " alcanzadas también muestran valores superiores en los hormigones con adición del 1% de fibras de acero.

La ductilidad de los hormigones con adición de fibras de acero en 1% en peso de cemento es notablemente mejor en comparación con el hormigón con 1% de adición de CNFs. La forma de la rama descendente presenta una pendiente menor que en hormigones con adición de CNFs.

Figura 5.61. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de acero

En la figura 5.62 se compara el comportamiento de resistencia a compresión entre las probetas de hormigón con adición de 1% de fibras de acero y hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento. Se puede observar como el comportamiento entre hormigones con estos porcentajes de adición es muy similar en lo que respecta a la ductilidad. Se demuestra una vez más, que la adición de fibras o nanofibras al 2% en peso de cemento mejora el comportamiento dúctil del hormigón. Cabe mencionar que la tensión máxima " $\sigma_{\max}$ " es mayor en los hormigones con adición de 1% de FA frente a hormigones con adición de 2% de CNFs. La fibra de acero que se incorpora al hormigón permite aumentar la resistencia mecánica del mismo, alcanzo valores muy superiores. Con respecto a la densidad de energía de deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " y la energía máxima " $E_{\max}$ " los valores alcanzados también son superiores en las probetas con adición de 1% de FA.

Figura 5.62. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 1% de fibras de acero

En las figuras 5.63 y 5.64 se comparan el comportamiento de resistencia a compresión entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs y hormigones con 2% de fibras de acero en peso de cemento. Es claramente apreciable que el comportamiento de la tensión máxima " $\sigma_{\max}$ " es mayor en los hormigones con 2% de adición de FA frente a los hormigones con 1% y 2% de CNFs. Por otro lado, la deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ " y energía máxima " $E_{\max}$ " dan valores superiores en los hormigones con 2 % de FA frente a los hormigones con 1% y 2% de CNFs. Este aumento de la tensión con respecto a la deformación cuando se incorpora la fibra de acero es conferido por la propia fibra y convierte al hormigón en un material más resistente.

La figura 5.64 muestra la mejora de la ductilidad en el hormigón cuando se aumenta la adición al 2% de CNFs en peso de cemento. Sin embargo, el aumento de fibra provoca una pérdida de la tensión máxima " $\sigma_{\max}$ " y de la densidad de energía de deformación máxima " $\epsilon_{\max}$ ".

Figura 5.63. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de acero

Figura 5.64. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición de 2% de fibras de acero

En la figura 5.65 se muestra la probeta de hormigón con adición de fibras de acero en 1% y 2% en peso de cemento, fragmentada después del ensayo a compresión. Se observa la disposición de las fibras de acero, que permite apreciar cómo se convierten en un elemento de unión entre el árido y la matriz de cemento, confiriendo mayor adherencia al hormigón.

Figura 5.65. - Rotura por compresión de probetas de hormigón con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento

5.5.5.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento

En el presente capítulo se compara el comportamiento en los ensayos a compresión de hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento respecto a hormigones que incorporan hibridación de fibras. Una hibridación utilizada es la adición de 1% de CNFs con 1% de fibras de acero en peso de cemento y otra la hibridación es la adición de CNFs en 1% con 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento.

En la figura 5.66 se compara el comportamiento en los ensayos a compresión de hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento respecto a hormigones con adición hibridada de fibras de CNFs en 1% y fibras de polipropileno en 1% en peso de cemento. Puede observarse como los hormigones que adicionan 1% de CNFs en peso de cemento tienen un

comportamiento menos regular a los hormigones con hibridación de fibras de 1% CNFs y 1% de fibras de polipropileno. Son mayores las tensiones máximas alcanzadas en los hormigones con CNFs en 1% en peso de cemento respecto a los hormigones hibridados. Con respecto a la ductilidad, los hormigones con adición hibridada muestran un comportamiento más regular con respecto a los hormigones con adición de 1% de CNFs. Este aumento de la ductilidad es debido al aumento en % de fibra y nanofibra, alcanzando un 2% de adición, mezclando las propiedades de ambas dos adiciones en el hormigón, convirtiéndolo en un material más dúctil. Cabe destacar que la densidad de energía de deformación alcanzada en los hormigones con adición de 1% de CNFs es similar con respecto a los hormigones con adición hibridada de CNFs y PP.

Figura 5.66. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno

En la figura 5.67 puede observarse como los hormigones con adición del 2% de CNFs en peso de cemento tienen un comportamiento muy similar a los hormigones con adición hibridada de 1% CNFs y 1% de fibras de polipropileno. Son mayores las tensiones máximas alcanzadas en los hormigones con CNFs en 2% en peso de cemento, en cambio, la ductilidad en los hormigones

hibridados es mayor con respecto a los hormigones con adición de 2% de CNFs.

Cabe destacar que la densidad de energía de deformación alcanzada en los hormigones con 2% de CNFs es también mayor con respecto a los hormigones con adición híbrida. Curiosamente la mezcla de fibras de PP y CNFs no revierte en un aumento de la tensión máxima, sino todo lo contrario, provoca una disminución de la tensión en relación a cuando son usadas de manera individual como adición.

Figura 5.67. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición híbrida de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno

5.5.6.- Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones con hibridación de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento

En las figuras 5.68 y 5.69 se comparan el comportamiento en los ensayos a compresión en hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de

cemento respecto a hormigones con adición hibridada de fibras de CNFs en 1% y fibras de acero en 1% en peso de cemento.

En la figura 5.68 puede observarse como los hormigones con adición de 1% de CNFs en peso de cemento tienen un comportamiento muy similar a los hormigones con hibridación de fibras de 1% CNFs y 1% de fibras de acero. Son mayores las tensiones máximas alcanzadas en los hormigones con adición de CNFs en 1% en peso de cemento. La ductilidad es muy parecida en los dos tipos de hormigones estudiados en este apartado. Cabe destacar que la densidad de energía de deformación alcanzada en los hormigones con 1% de CNFs es también mayor con respecto a los hormigones con adición hibridada.

Figura 5.68. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre hormigones con adición de 1% de CNFs y hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero

En la figura 5.69 puede observarse como los hormigones con adición del 2% de CNFs en peso de cemento, tienen un comportamiento muy similar a la hibridación de fibras con 1% CNFs y 1% de fibras de acero. Son mayores las tensiones máximas alcanzadas en los hormigones con CNFs en 2% en peso de cemento, con una ductilidad muy parecida en ambos grupos de los hormigones

estudiados. Cabe destacar que la densidad de energía de deformación alcanzada en las probetas con 2% de CNFs es también mayor con respecto a los hormigones con adición hibridada de fibras de acero. La combinación de fibra de acero con nanofibra de carbono otorga al hormigón una menor ductilidad que otros tipos de hormigones estudiados.

Figura 5.69. - Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ε) entre hormigones con adición de 2% de CNFs y hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero

La figura 5.70 muestra el aumento de resistencia en tanto por ciento (%) de los hormigones con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno e hibridación de CNFs con fibras de acero respecto a los hormigones sin adición como elemento de referencia en las comparativas.

A partir de la comparativa, se muestra la pérdida o aumento entre las diferentes comparativas llevadas a cabo. Se trata de una gráfica de barras en tanto por ciento (%) donde se relaciona la tensión máxima alcanzada " $\sigma_{\max}$ " por cada tipo de hormigón estudiado en relación con un hormigón sin adición.

Como punto de partida hay que mencionar que la tensión máxima alcanzada " $\sigma_{\max}$ " por todos los tipos de hormigones estudiados, supone una mejora con

respecto al hormigón tradicional de referencia. Este hecho demuestra que la adición de fibras y/o nanofibras supone una mejora en el comportamiento mecánico del hormigón.

En el análisis de los hormigones con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento, se observa una sensible mejora en su resistencia en relación a un hormigón sin adición. De suma importancia, es la incorporación al hormigón de CNFs al 2% en peso de cemento, pues reduce la resistencia con respecto al hormigón con adición de CNFs al 1% en peso de cemento.

El análisis de los hormigones con hibridación de CNFs y fibras de acero e hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, se puede observar como las tensiones disminuyen con respecto al hormigón con adición de CNFs, siendo sus valores prácticamente los mismos que los de un hormigón tradicional.

Cabe destacar los comportamientos obtenidos en hormigones con adición de PP-1% y PP-2% y de FA-1% y FA-2%. El aumento de resistencia alcanza un valor muy por encima de los obtenidos en hormigones sin adición y en los otros hormigones estudiados.

Por tanto, concluir que las nanofibras de carbono mejoran sensiblemente el comportamiento mecánico del hormigón. La hibridación de fibras con nanofibras no supone una gran ventaja en el comportamiento mecánico del hormigón. Señalar, que las ventajas realmente importantes en el comportamiento mecánico del hormigón, son las alcanzadas con la adición de fibras de polipropileno y acero.

Figura 5.70. - Pérdidas y aumentos de resistencia en tanto por ciento en hormigones con adición de CNFs, adición de fibras de polipropileno, adición de fibras de acero, hibridación de CNFs con fibras de polipropileno, hibridación de CNFs con fibras de acero y hormigones sin adición

5.6.- Caracterización química y microscópica mediante la técnica Scanning Electron Microscopy (SEM) del hormigón con adición de CNFs, con adición de fibras de polipropileno, con adición de fibras de acero y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego

En el siguiente capítulo se lleva a cabo un estudio de la caracterización química y microscópica del hormigón. De suma importancia es el análisis del hormigón antes y después de ser sometido al ensayo a fuego. Para ello, se lleva a cabo un estudio de los hormigones después del ensayo a rotura por compresión y el ensayo a fuego. El análisis se practica en muestras de hormigones con adición de nanofibras de carbono (CNFs) en 1% y 2% en peso de cemento, fibras de polipropileno (PP) en 1% y 2% en peso de cemento, fibras de acero (FA) en 1% y 2% en peso de cemento, hibridación de 1% de CNFs con 1% de fibras de polipropileno (GF-PP), hibridación 1% de CNFs con 1% de fibras de acero (GF-FA) y hormigones sin adición (SA). A partir de las imágenes que se muestran a continuación de las muestras estudiadas, se detectan importantes datos morfológicos y químicos.

5.6.1.- Comparativa de la caracterización microscópica entre hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego

En el siguiente capítulo se estudia la microscopía electrónica de barrido (SEM) a diferentes aumentos (300, 2000 y 5000) en hormigones con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, 2% de CNFs en peso de cemento y hormigones sin adición antes y después del ensayo a fuego. La diferencia de aumento, nos permite acercarnos con más detalle a la estructura interna del hormigón. A través de los diferentes aumentos estudiados, profundizamos en el aspecto textural de la muestra para detallar las características observadas. Se muestra una comparativa entre las imágenes de los hormigones antes y después del ensayo a fuego para observar las diferencias estructurales y texturales que provoca el fuego.

5.6.1.1.- Comparativa de la microscopía electrónica de barrido a 300 aumentos y 20kV en hormigones con adición de CNFs al 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego

En la figura 5.71 se muestra una comparativa de las características morfológicas y texturales a 300 aumentos sobre probetas SA, GF-1% y GF-2% antes y después del ensayo a fuego.

En la columna correspondiente a las imágenes de las probetas no expuestas al fuego (columna a), se observa la distribución y textura de un compuesto perfectamente homogeneizado, donde el gel del cemento, la formación de etringita y los áridos parecen un único compuesto, lo que responde a una estructura perfectamente monolítica propia del hormigón.

En la figura 5.71-1a) se observa perfectamente la zona de unión comprendida entre el árido y la matriz, lo que permite demostrar una excelente homogeneización y adherencia entre el gel cementicio y el árido.

Del mismo modo en las figuras 5.71-2a) y 5.71-3a) observamos esa continua trama cristalina cuasi-perfecta, donde incluso se aprecia la formación de etringita y portlandita en el interior de los poros existentes.

En las imágenes correspondientes a la columna de exposición al fuego (columna b) con definición textural a 300 aumentos, cabe destacar que dada la exposición térmica de las muestras, parte de la etringita y los grumos de gel de CSH son destruidos y dispersados como consecuencia del calor, dando lugar a un aspecto textural más liso, donde las formaciones aciculares de etringita no son tan pronunciadas. La línea de unión entre el gel y el árido queda más pronunciada, separándose y fisurándose sensiblemente debido a las dilataciones térmicas y retracciones.

En el poro de la figura 5.71-1b) se puede observar con perfecta claridad que se produce esa separación que rompe el monolitismo entre el árido y la pasta. En el interior del poro, los grumos de etringita quedan fusionados y dispersados, con aspecto más redondeado. En la figura 5.71-3b) se aprecia nuevamente, que el gel cementicio no queda adherido al árido del mismo modo que antes de ser expuesto al fuego.

A pesar de que la unión entre la pasta de cemento y el árido no es tan perfecta, la textura es prácticamente continua del material y persiste la estructura, manteniendo la propiedad monolítica del material.

Figura 5.71. - Microscopía electrónica de barrido a 300 aumentos y 20kV en probetas GF-1%, GF-2% y SA antes y después del incendio

5.6.1.2.- Comparativa de la microscopía electrónica de barrido a 2000 aumentos y 20kV en hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego

En el siguiente apartado se lleva a cabo la comparativa de las siguientes imágenes a 2000 aumentos. En la columna con las imágenes de las probetas no expuestas al fuego (columna a), se observa la presencia de gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H) formado por la hidratación del cemento. Puede observarse que su textura tiene forma globular con formas más circulares que responden a la formación de portlandita con una perfecta trama de las formas aciculares de la etringita. Señalar la matriz del nódulo, donde destaca la formación de pequeños grumos de gel de CSH junto con delgadas fibras de silicato cálcico hidratado y cristales de forma acicular junto con otras algo más gruesas de etringita.

Como se observa en la figura 5.72-2a) y 5.72-3a) la descripción textural del material, permite apreciar las formas aciculares y la orientación de las fibras de manera radial hacia el exterior del nódulo, conformando una malla cristalina perfectamente trabada y densa. Se muestra en la figura 5.72-2a) los nódulos anidados de CSH en una fase más avanzada, donde las matrices de gel de silicato se agrupan, dejando espacios cada vez más cerrados y trabados por las fibras de CSH.

El silicato cálcico hidratado es un compuesto principal del cemento y el máximo responsable de las propiedades resistentes, a través de sus ramificaciones situados alrededor del nódulo y orientadas hacia los granos del árido une los compuestos, anclando el conjunto pasta-árido y proporcionando a la matriz cementicia cohesión y rigidez.

En la columna correspondiente a las imágenes de las muestras expuestas al incendio (columna b), se observa en la imagen 5.72-1b) como muchas de las fibras de CSH han quedado destruidas, disminuyendo el número de ellas y los nódulos quedan más aislados unos de otros con menos uniones entre los mismos. Sin embargo, En la figura 5.72-2b) se observa, en este caso, que la fusión de acículas de etringita no es masiva, continúa existiendo esta disposición de red cristalina cuasi perfecta que demuestra el comportamiento mejorado en los ensayos de resistencia a compresión de las probetas que contienen CNFs.

Desaparece esa perfecta orientación de las fibras y muchas de ellas quedan fracturadas por la acción del fuego. Por último en la figura 5.72-3b) se observa

una vacuola en cuyo interior del poro han desaparecido las fibras de etringita por la agresión térmica, aunque mantiene en los bordes fibras de CSH que aún le confieren resistencia y cohesión a la estructura.

Figura 5.72. - Microscopía electrónica de barrido a 2000 aumentos 20kV en probetas GF-1%, GF-2% y SA antes y después del incendio

5.6.1.3.- Comparativa de la microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos y 20kV en hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% en peso de cemento y hormigones sin adición, antes y después del ensayo a fuego

En las siguientes imágenes a 5000 aumentos el detalle de definición de la distribución textural estructura es mucho mayor, lo que permite evaluar datos más concretos en la configuración estructural.

Las imágenes de las muestras expuestas al fuego (columna b) poseen una claro rasgo común y característico en todas las formas aciculares y puntiagudas que han quedado redondeadas. Las muestras presentan un aspecto de textura más difuminada y plana, sin observarse los nódulos de acumulaciones de portlandita y etringita. La textura se torna a un aspecto más degradado, de forma homogénea, desapareciendo la perfecta red cristalina y convirtiéndose en una materia sin estructura.

Por el contrario, en las imágenes no expuestas al fuego (columna a), se observa una clara estructura cerrada en forma globular, con fases intermedias y avanzadas de etringita, con una morfología sana y una buena integración de la pasta con el sulfato cálcico y aluminio.

Comparando la imagen 5.73-1a) y 5.73-1b), podemos observar como en la imagen 5.73-1a) los silicatos de aluminio y de calcio que forman la etringita tienen una forma acicular muy definida, las partes correspondientes a formas circulares se corresponden con la formación de portlandita. En la imagen 5.73-1b) los sulfatos y los carbonatos reaccionan frente a la acción del fuego, fundiéndose gran cantidad de etringita. Las burbujas desaparecen claramente y la estructura queda más abierta.

En la imagen 5.73-2a) y 5.73-3a) la forma globular tan destacada se corresponde con una buena integración de la mezcla, los nódulos quedan recubiertos por un conjunto de formas aciculares de diferentes tamaños y espesores, que se enlazan unas con otras hasta crear una malla cristalina.

En las imágenes 5.73-2b) y 5.73-3b) a pesar de la abrasión del material, todavía se observan cristales que resisten la agresión térmica del fuego, y

permite que continúe la unión entre la pasta y los áridos. Los poros prácticamente desaparecen para ser ocupados por la pasta cementicia.

Figura 5.73. - Microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos 20kV en probetas GF-1%, GF-2% y SA antes y después del incendio

5.6.2.- Microanálisis por energía dispersa de rayos X en lámina delgada a 100 aumentos en hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

Se ha llevado a cabo un estudio sobre el microanálisis por energía dispersa de rayos x, analizando la composición química elemental a partir del análisis semicuantitativo de los áridos de hormigón y la matriz en algunas de las muestras de los grupos estudiados. A continuación en la figura 5.74 se presenta el microanálisis por energía dispersa de rayos X a 100 aumentos en lámina delgada, en hormigones con adición del 2% de CNFs en peso de cemento, antes y después del incendio.

A continuación en las imágenes 5.74-a), 5.74-b), 5.74-c) y 5.74-d) los espectrogramas revelan las descripciones mineralógicas, donde observamos que aparece la presencia de SiO_2 . El gel CSH por tener fórmula $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, se trata de un silicato cálcico que ha sufrido una reacción de hidratación para convertirse en un gel cementoso. Encontramos también, presencia de Na y Mg que proviene del origen de las rocas que se utilizan en la elaboración del cemento.

Generalmente la pasta de cemento hidratada está constituida por un conjunto de fases cristalinas tales como: la portlandita (Ca (OH)_2), la etringita y el monosulfoaluminato cálcico hidratado. Al fraguar el silicato cálcico hidratado se consigue trabar al árido (arena y/o grava) con la propia matriz.

La presencia de CaO es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de cálcico, se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomías.

La presencia de oro (Au) y de Titanio (Ti) son debidas al recubrimiento que se incorpora a las muestras para conseguir una superficie conductora y proceder al estudio mineralógico de las probetas.

A continuación se presenta en la figura 5.74 el microanálisis por energía dispersa de rayos X a 100 aumentos en probetas de hormigón con adición de CNFs al 2% en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego, y después del ensayo a compresión. Estas muestras son preparadas en la técnica de lámina delgada. El análisis de la imagen 5.74-a) se pueden observar

unas formaciones de color oscuro muy destacadas, estas formaciones corresponden con la resina utilizada para la preparación de la muestra. En la escala cromática utilizada, los colores oscuros representan materiales ligeros, de poco peso, por el contrario los colores blancos se identifican con minerales pesados. La presencia de nanofibras de carbono (CNFs) corresponde con las coloraciones de color gris oscuro distribuidas por todo el gel cementicio. Debido a su perfecta dispersión en la pasta, las CNFs se aprecian muy diseminadas, lo que responde a la buena homogeneización existente en el proceso y al no aglutinamiento en cúmulos. La figura 5.74-b) muestra el espectrograma correspondiente al análisis tomado en un punto de la imagen 5.74-a). En el análisis podemos observar la presencia de calcio, sílice, sodio y magnesio propios de la formación del cemento. En la imagen 5.74-d) se muestra el espectrograma de un punto de la muestra tomado en la imagen 5.74-c). Podemos ver como el análisis mineralógico nos revela la presencia de una importante cantidad de hierro (Fe), como consecuencia de la exposición al fuego, donde la descomposición de los materiales por el efecto del fuego, da lugar a la formación de hierro y oxígeno.

GF-2% - NO EXPOSICIÓN AL FUEGO

GF-2% - EXPOSICIÓN AL FUEGO

Figura 5.74. - Microanálisis por energía dispersa de rayos X en hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, en lámina delgada a 100 aumentos antes del fuego y después del fuego

5.6.2.1.- Microanálisis por energía dispersa de rayos X en lámina delgada a 500 aumentos en hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

A continuación en la figura 5.75 se presenta el microanálisis por energía dispersa de rayos X a 500 aumentos en lámina delgada, en hormigones con adición del 2% de CNFs en peso de cemento, antes y después del incendio.

El espectrograma que se observa en la imagen 5.75-b) evidencia la presencia de carbono en cantidades elevadas, lo que demuestra la existencia de nanofibras de carbono. Se puede observar en la imagen 5.75-a) una gran

cantidad de poros dispersados de color gris oscuro que se corresponden con acumulaciones de CNFs. Los compuestos de color blanco, se identifican con los áridos presentes en la mezcla, y los colores grises intermedios representan el gel de cemento existente.

En la imagen 5.75-d) se muestra el espectrograma de un punto de la muestra tomado en la imagen 5.75-c). Se puede observar como el análisis mineralógico nos arroja datos sobre la presencia de una importante cantidad de hierro (Fe) y potasio (K), como consecuencia de la exposición al fuego. El fuego descompone los materiales dando lugar a la formación de hierro, oxígeno y potasio en cantidades elevadas.

GF-2% - NO EXPOSICIÓN AL FUEGO

GF-2% - EXPOSICIÓN AL FUEGO

Figura 5.75. - Microanálisis por energía dispersa de rayos X en hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, en lámina delgada a 500 aumentos antes del fuego y después del fuego

5.6.3.- Comparativa de la caracterización microscópica de hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, antes y después del ensayo a fuego

En el siguiente capítulo se estudia la microscopía electrónica de barrido (SEM) a diferentes aumentos en hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento antes y después del ensayo a fuego, así como su caracterización química. Saber cómo varía la composición mineralógica y la disposición a nivel de las fibras en una probeta de hormigón después de una exposición al fuego, es necesario para explicar el diferente comportamiento en cuanto a su resistencia a compresión.

Como puede observarse en las figuras 5.76-1a) y 5.76-2a) la unión de la matriz cementicia y la fibra de polipropileno es casi perfecta, consiguiendo como resultado que el material trabaje solidariamente y permita sumar las propiedades intrínsecas de la fibra de polipropileno. La propia fibra de PP está recubierta por una malla con formas aciculares de menor tamaño. Estos datos justifican el mejor comportamiento demostrado en los ensayos de resistencia a compresión en las probetas que contienen fibras de polipropileno.

Las figuras 5.76-1b) y 5.76-2b) corresponde a una muestra sometida al ensayo a fuego directo, donde puede observarse con absoluta claridad una dispersión de las fibras de polipropileno por la matriz de cemento, aumentando la abertura de poros en la masa. La matriz cementicia fragmentada queda unida por las fibras de polipropileno diseminadas, que ocupan los espacios de los poros existentes de la deshidratación. El aumento de presión y temperatura en el interior del cemento provoca la fusión del polipropileno dada la temperatura media de 200°C alcanzada en la probeta, fundiendo las fibras y generando numerosos hilos en estado plástico de polipropileno. Los hilos de polipropileno ocupan los huecos de la matriz cementicia, reconstruyendo así los poros y fisuras del hormigón, logrando un mejor comportamiento mecánico después de la agresión térmica.

Figura 5.76. - Microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos 20kV en hormigones con adición de fibra de PP al 1% y 2% en peso de cemento antes y después del ensayo a fuego

5.6.4.- Comparativa de la caracterización microscópica de hormigones con adición de 1% y 2% de fibras con acero, antes y después del ensayo a fuego

El SEM nos arroja importantes datos que puedes observarse en la figura 5.79, donde se muestran los resultados del estudio microscópico sobre los hormigones con adición de fibras de acero en 1% y 2% en peso de cemento antes y después de haber sido sometidas al ensayo de fuego.

Como se puede observar en la figura 5.77-1a), la unión entre la pasta de cemento y la fibra de acero es excelente, quedando embebida la propia fibra en gel cementicio y creando una perfecta adherencia. En la figura 5.77-1b) podemos apreciar como la etringita ha sufrido una cierta degradación debida a la exposición térmica, apareciendo discontinuidades de las fibras de CSH.

Estas discontinuidades de la formación de etringita son de alguna manera asumidas por las fibras de acero, que hacen de puente de transmisión.

En la figura 5.77-2a) se observa la perfecta adherencia entre el árido y la pasta de cemento, creando una mejor trabazón gracias al contenido de fibra de acero añadido. Cabe destacar la ausencia de erizos en la matriz, ello es debido a la buena homogeneización de la mezcla en estado seco previamente, evitando así las acumulaciones de fibras. Por último, en la figura 5.77-2b) se muestra la degradación de las formas aciculares de etringita, observándose contornos menos definidos y pérdida de estabilidad.

Figura 5.77. - Microscopía electrónica de barrido a 5000 aumentos 20kV en hormigones con adición de fibra de acero al 1% y 2% en peso de cemento antes y después del ensayo a fuego

CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES

6.1.- Comportamiento durante el ensayo a fuego en hormigones con adición y sin adición

- Los hormigones con adición del 2% de CNFs en peso de cemento, alcanzan mayor temperatura que un hormigón con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, debido a un aumento de la conductividad térmica.
- Los hormigones con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, presentan un enfriamiento acusado después de la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento, absorben más calor ante la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento, disminuyen la fisuración por enfriamiento lento.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento, tienen un enfriamiento irregular ante la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición de 1%-2% de fibras de acero en peso de cemento, alcanzan gradualmente mayores temperaturas ante la exposición al fuego que el hormigón sin adición.
- Los hormigones con adición de 1%-2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, presentan un comportamiento regular frente a la acción del fuego.
- Los hormigones con adición de 1%-2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, disminuyen la fisuración ante la exposición al fuego.
- Los hormigones sin adición presentan un descenso brusco de la temperatura ante la exposición al fuego.

6.2.- Comportamiento mecánico a compresión en hormigones con adición y sin adición, después del ensayo de fuego

- Los hormigones con adición de 1% de CNFs en peso de cemento expuestos al fuego, alcanzan mayores tensiones y deformaciones que un hormigón tradicional, perdiendo ductilidad una vez alcanzadas las tensiones máximas.
- Los hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, alcanzan menores deformaciones y tensiones que un hormigón tradicional, cuando son expuestos al fuego y mantienen una ductilidad muy similar al hormigón tradicional.
- Los hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, empeoran su capacidad mecánica después del fuego.
- Los hormigones con adición de CNFs en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento, alcanzan mayores tensiones después de la exposición al fuego que el hormigón con CNFs en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento sin ser expuesto al fuego.
- Los hormigones con adición de 1% de CNFs alcanzan mayores tensiones que los hormigones con adición de 2% de CNFs después de la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición de 1% de CNFs pierden ductilidad con respecto a los hormigones con adición de 2% de CNFs después de la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición de fibras de CNFs en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento, alcanzan menores tensiones y deformaciones que el hormigón con adición de fibras de PP en porcentajes del 1% y 2% después de la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición de fibras de CNFs en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento, presentan mejor ductilidad frente a los hormigones con adición de fibras de PP en porcentajes del 1% y 2% después de la exposición al fuego.

- La ductilidad de los hormigones con 1% de CNFs, después de la exposición al fuego es similar a la de los hormigones con 1% de fibras de PP sin exposición al fuego.
- Los hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de acero en peso de cemento, alcanzan mayores tensiones y deformaciones que los hormigones con adición de 1% y 2% de CNFs en peso de cemento después de la exposición al fuego, pero disminuyen considerablemente su ductilidad.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de PP en peso de cemento, después de la exposición al fuego, presentan menores tensiones y deformaciones respecto del hormigón con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de PP en peso de cemento, después de la exposición al fuego, presentan una ductilidad similar a los hormigones con adición de CNFs.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de polipropileno en peso de cemento después de la exposición al fuego, muestran valores superiores en la tensión máxima que antes de la exposición al fuego.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento después de la exposición al fuego, presentan menores tensiones y deformaciones respecto del hormigón con adición de CNFs en 1% y 2% en peso de cemento.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento después de la exposición al fuego, presentan una ductilidad similar a los hormigones con adición de CNFs.
- Los hormigones con adición hibridada de 1% de CNFs y 1% de fibras de acero en peso de cemento después de la exposición al fuego, presentan valores superiores en la tensión máxima que antes de la exposición al fuego.

6.3.- Comportamiento de la conductividad térmica en hormigones con adición y sin adición

- Los hormigones con adición de CNFs (1%-2%) en peso de cemento, disminuyen su coeficiente de conductividad térmica en una media de un 16% respecto a un hormigón sin adiciones.
- Los hormigones con hibridación de fibras (CNFs y fibras de polipropileno o CNFs y fibras de acero) obtienen conductividades térmicas de valores intermedios a los alcanzados con un solo tipo de adición.
- Los hormigones con adición de 1% y 2% de fibras de polipropileno en peso de cemento, reducen el coeficiente de conductividad térmica un 18% respecto de un hormigón tradicional.
- Los hormigones con adición del 2% de fibra de polipropileno en peso de cemento, presentan un coeficiente de conductividad térmica menor, debido a una mayor cantidad de fibra en el hormigón.
- Los hormigones con adición de fibras de acero, presentan un mayor coeficiente de conductividad térmica que los hormigones sin adición.
- Los hormigones con adición de fibras de acero en 1% en peso de cemento, presentan un coeficiente de conductividad térmica mayor que con un 2% de adición de fibra de acero.

6.4.- Comportamiento mecánico a compresión en hormigones con adición y sin adición

- Los hormigones con adición de 1% de CNFs en peso de cemento, presentan mayor resistencia a compresión que los hormigones sin adición, presentan menores deformaciones máximas y disminuye su ductilidad notablemente.
- Los hormigones con adición de 2% CNFs en peso de cemento, presentan menor resistencia a compresión que los hormigones con adición de 1% de CNFs y aumentan su deformación máxima.

- Los hormigones con adición de 2% de CNFs en peso de cemento, presentan mayores ductilidades que los hormigones con adición de 1% de CNFs.
- Los hormigones con adición de CNFs (1%-2%) en peso de cemento, alcanzan menores tensiones máximas que los hormigones con adición de fibras de PP.
- Los hormigones con adición de CNFs (1%-2%) en peso de cemento, presentan mayores ductilidades que los hormigones con adición de fibras de PP y disminuye el valor de sus deformaciones máximas.
- Los hormigones con adición de CNFs alcanzan menores tensiones máximas y deformaciones máximas que los hormigones con adición de fibras de acero.
- Los hormigones con adición de 1% de fibras de acero en peso de cemento, presentan mayores ductilidades que los hormigones con adición de 1% de CNFs.
- Los hormigones con adición de 2% de fibras de acero en peso de cemento, presentan una ductilidad similar al hormigón con adición de 1% de CNFs.
- Los hormigones con adición de CNFs alcanzan mayores tensiones máximas y deformaciones máximas que los hormigones con adición híbrida de GF-PP.
- Los hormigones con adición híbrida de GF-PP presentan mayores ductilidades que los hormigones con adición de CNFs.
- Los hormigones con adición de CNFs alcanzan mayores tensiones máximas y deformaciones máximas que los hormigones con adición híbrida de GF-FA.
- Los hormigones con adición híbrida de GF-FA presentan una ductilidad similar a los hormigones con adición de CNFs.

- Los hormigones con adición de fibras de acero alcanzan mayores tensiones y deformaciones máximas que los hormigones con adición de CNFs.
- Los hormigones con adición hibridada de CNFs y fibras de acero e hibridación de CNFs y fibras de polipropileno, presentan menores tensiones máximas que los hormigones con adición de CNFs.
- Los hormigones con adición hibridada de CNFs y fibras de acero e hibridación de CNFs y fibras de polipropileno presentan tensiones y deformaciones máximas similares a un hormigón tradicional.

6.5.- Caracterización química y microscópica mediante la técnica SEM, entre hormigones con adición de CNFs con 1% y 2% y hormigones sin adición antes y después del ensayo a fuego

- Los hormigones con adición de CNFs presentan una textura y distribución cristalina cuasi-perfecta. Presentan buena adherencia entre el gel cementicio y los áridos.
- Los hormigones con adición de CNFs después del ensayo a fuego, presenta un aspecto textural liso y redondeado. Presentan peor adherencia entre el gel cementicio y los áridos.
- Los hormigones con adición de CNFs después del ensayo a fuego, reduce las formas aciculares y puntiagudas de la perfecta red cristalina.
- Los hormigones con adición de fibras de PP presenta una textura en forma acicular y globular. Presentan una perfecta adherencia con la propia fibra de PP, creando una malla con formas aciculares de menor tamaño.
- Los hormigones con adición de fibras de PP después del ensayo a fuego, presentan fibras de polipropileno dispersadas que ocupan los huecos del hormigón.
- Los hormigones con fibras de PP después del ensayo a fuego, presentan una perfecta adherencia entre el gel cementicio y los áridos.

- Los hormigones con adición de fibras de acero, presentan una textura con buena adherencia, donde la propia fibra establece una malla con el gel de cemento.

6.6.- Conclusiones

La adición de CNFs y/o fibras en el hormigón, contribuye a elegir las condiciones de transferencia de calor, permitiendo realizar diseños de hormigones con conductividades térmicas concretas en función de las necesidades existentes. Mejora el efecto “spalling” durante la exposición al fuego y varía la temperatura durante la fase de enfriamiento en función de la adición añadida.

Desde el punto de vista mecánico, la adición de CNFs y/o fibras en el hormigón mejora el comportamiento mecánico del hormigón después del fuego, aunque una excesiva adición disminuye la capacidad mecánica del mismo. La ductilidad del hormigón se ve afectada por la adición de CNFs y/o fibras, obteniendo resultados muy positivos.

Sin exposición al fuego previa, la adición de CNFs y/o fibras en el hormigón supone una mejora en el comportamiento mecánico respecto a un hormigón sin adiciones, viéndose modificada su ductilidad.

Por todo ello, la adición de CNFs y/o fibras es una muy buena alternativa al hormigón tradicional.

7.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las futuras líneas de investigación previstas una vez concluida la investigación, se centran en los siguientes aspectos:

- Estudiar el comportamiento mecánico sometiéndolos a otras cargas de fuego de las estudiadas en la presente investigación.
- Estudiar el rendimiento frente a la acción del fuego en los hormigones estudiados con enfriamiento rápido del ensayo a fuego.
- Analizar el comportamiento al fuego de hormigón con otro tipo de adición, para comparar su comportamiento respecto a los empleados en el presente trabajo.
- Repetir las experiencias anteriores cuando se emplean otros tipos de porcentajes de adición.
- Analizar el comportamiento de piezas a escala real.

BIBLIOGRAFÍA

ABRISHAMBAF, A.; AO BARROS, J.; MCF CUNHA, V. "Ley ancho estrés grieta de tracción para la fibra de acero de hormigón armado autocompactante obtenida de (alternativa) ensayos de tracción indirecta". *Cement and Concrete Research*, 57, 2015, p. 153-165.

ABU AL-RUB, R.K.; ASHOUR, A.I.; TYSON, B.M. "On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites". *Construction and Building Materials* 35, 2012, p. 647-655.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 12390-1:2013: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes*. AEN/CTN 83 – Hormigón, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. ISO 834-11:2014. *Fire resistance tests -- Elements of building construction -Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements*.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. PNE-EN 1363-1: 2012. *Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales*. AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 1363-2:2000. *Ensayos de resistencia al fuego. Parte 2: Procedimientos alternativos y adicionales*. AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 1365-4:2000. *Ensayos de resistencia al fuego de los elementos portantes. Parte 4: Pilares*. AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 12620:2003+A1:2009. *Áridos para hormigón*. AEN/CTN 146 – Áridos, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 13139/AC: 2004. *Áridos para morteros*. AEN/CTN 146 – Áridos, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. PNE-prEN 197-1:2012. *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. AEN/CTN 80 – Cementos y cales, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 12350-2:2009. *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*. AEN/CTN 83 - Hormigón España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 12390-2:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*. AEN/CTN 83 - Hormigón, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 12390-3:2009. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. AEN/CTN 83 - HORMIGÓN, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. ISO 834-11:2014. *Fire resistance tests - Elements of building construction -Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements*.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 14889-1:2008. *Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad*. AEN/CTN 83 - HORMIGÓN, España.

AENOR. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 14889-2:2008. *Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad*. AEN/CTN 83 -Hormigón España.

AGOPYAN, V. "Durability of Vegetable Reionforced Materials". *Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de Sao Pablo*, 1986, Brasil.

AKERS, S.A.S.; STUDINKA, J.B. "Againg Behaviour of Cellulose Fibre Cement Composites in Natural Weathering and Accelerated Tests", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11(2), 1989.

AL QADI, A.N.S.; AL-ZAIDYEEN, S.M. "Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures". *Journal of King Saud University– Engineering Sciences*, 26, 2014, p. 33-39.

ANCHOR, R.D.; MALHOTRA, H.L.; PURKISS, J.A. "Design of structures against fire". Essex, UK: *Elsevier Applied Science Publisher*, 1986.

ASAD Z.; MAJID, ALI. "Behavior of fiber reinforced concrete for controlling the rate of cracking in canal-lining". *Construction and Building Materials* 155, 2017, p.726-739.

ASTM E1530: "Standard test method for evaluating the resistance to termal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique". *ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA*, 2011.

ASTM. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. ASTM D5334. 2014.

ATIENZA RIERA, J.M.; CALAFAT, E. "Comportamiento de las armaduras activas después de un fuego" Universidad Politécnica de Madrid.

BALÁZS NAGY B.; GEORGES NEHME, S.; SZAGRI, D. "Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes" *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*. Energy Procedia 78, 2015, p. 2742-2747.

BAZANT, Z. P.; KAPLAN, M. F. "Concrete at High Temperatures". *Material Properties and Mathematical Models*, 1996.

BAZANT, Z. P.; CHERN, D J.C. "Stress-induced thermal and shrinkage strains in concrete". *Journal of Engineering Mechanics*, 113 (10), 1987, p. 1493-1511.

BEDNÁR, J.; WALD, F.; VODICKA, J.; KOHOUTKOVÁ, A. "Experiments on membrane action of composite floors with steel fibre reinforced concrete slab exposed to fire". *Fire Safety Journal*, 59, 2013, p. 111–121.

BILODEAU, A.; KODUR, V.K.R; HOFF, G.C. "Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire". *Cement & Concrete Composites*, 26, 2004, p. 163-174.

BRATINA, S. B.; CAS, M.; SAJE, I. "Planinc, Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2" *Int. J. Solids Struct.* 42, 2005, p. 5715-5733.

BUCHANAN, A. H.; WILEY, J.; CHICHESTER S.; "Fire engineering for a performance based code". *Fire Safety Journal*, 23 (1), 2002, p.1-16.

CTE DB SI. Seguridad en caso de incendio ANEJO C. Hormigón Armado, 2006.

GALAO, O.; BAEZA, F.J.; ZORNOZA, E.; GARCÉS, P. "Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture". *Cem. Concr. Compos*, 46, 2014, p. 90-98.

CAPUA, D.; MARI, A.R.; "Nonlinear analysis of reinforced concrete cross sections exposed to fire received". *Fire Saf. J.*, 42, 2007, p. 139-149.

CHEN, L.; XIE, H.; YU, W.; WANG, B.; WU, Z. "Thermal transport behaviors of suspended graphene sheets with different sizes". *Int. J. Therm. Sci.*, 94, 2015, p. 221-227.

CHUAH, S.; PAN, Z.; SANJAYAN, J.G.; WANG, C.M.; DUAN, W.H. "Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide". *Construction and Building Materials*, 73, 2014, p. 113-124.

CHOUMANIDIS, D.; BADOGIANNIS, E.; NOMIKOS, P.; SOFIANOS, A. "The effect of different fibres on the flexural behaviour of concrete exposed to normal and elevated temperatures". *Construction and Building Materials*, 129, 2016, p. 266-277.

COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; FELICETTI, R.; "Mechanical properties of steel fibre reinforced concrete exposed at high temperatures" *Materials and Structures*, 43, 2010, p. 475-491.

CRISTOFANO A.H.; MARTIN L.D. "Design for fire resistance of precast prestressed concrete". *Second Edition, Prestressed Concrete Institute PCI*, 1989.

DOO-YEOL, Y.; KYUNG-HWAN, M.; JOO-HA, L.; YOUNG-SOO, Y. "Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age". *Construction and Building Materials*, 73, 2014, p. 357-365.

DU, H.; GAO, H.J.; PANG, S.D. "Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet". *Cem. Concr. Res.* 83, 2016, p.114-123.

DWAIKAT, M. B.; KODUR, V.K. "Fire induced spalling in high strength concrete beams". *Fire Technology*, 46 (1), 2010, p. 251-274.

DWAIKAT, M. B.; KODUR, V. K. "Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems". *Fire Safety Journal*, 44 (3), 2009, p. 425-434.

EAMONA, C.D.; JENSEN, E. "Reliability analysis of reinforced concrete columns exposed to fire", *Fire Safety*, 62, 2013, p. 221-229.

EUROCODE 1 – EN 1991. Actions on structures. Part 1-2: general actions- actions on structures exposed to fire. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2002.

EUROCODE 2 – EN 1992. Design of Concrete Structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings; European Committee for Standardization, Brussels, 2004.

FARMINGTON HILLS, M. "Building Code Requirements For Reinforced Concrete and Commentary". *American Concrete Institute*, 2008.

FARMINGTON HILLS, M. "Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies". *American Concrete Institute*, 2007.

FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. "Las resinas epoxi en la construcción". *Informes de la Construcción*, 16, (159), 1964.

FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. "Patología terapéutica del hormigón armado" *Editorial ETS de ingenieros de caminos*, 1994.

FIKE R.; KODUR, V. "Enhancing the fire resistance of composite floor assemblies through the use of steel fiber reinforced concrete". *Eng. Struct.* 33 (10), 2011, p. 2870-2878.

file:///F:/BIBLIOGRAFIA%20ARTICULOS/BIBLIOGRAFIA%20FIBRAS/V-utilizacion_fibras_en_hormigones.pdf

FIRE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES. "materials, structures and modelling," *FIB Bulletin 38, The International Federation for Structural Concrete*. Lausanne, Switzerland, 2007.

GAIO, A.; PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K.; VANIA, M.; PERES, N.N. "Resistencia a la fatiga y agrietamiento mecanismo de pavimentos de hormigón reforzado con fibras de acero reciclado, recuperado de neumáticos post-consumo". *Engineering Structures*, 45, 2012, p. 385-395.

GEIM ANDRÉ, K. "El grafeno, forma de carbono de reciente obtención, proporciona un rico sustrato a la física fundamental y promete múltiples aplicaciones". *Investigación y Ciencia*, 381, 2008.

GRAPHENANO NANOTECHNOLOGIES. "El grafeno: propiedades y aplicaciones", 2017.

HAN, L.; TAN, Q.; SONG, T. "Fire performance of steel reinforced concrete (SRC) structures". *The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. Procedia Engineering*, 62, 2013, p. 46-55.

HARMATHY, T. Z. "A comprehensive creep model". *Journal of Basic Engineering*, 89 (3), 1967, p. 496-502.

HARMATHY, T. Z. "Fire Safety Design and Concrete". *JohnWiley & Sons, New York*, 1993.

HARMATHY, T.Z. "Fire safety design & concrete". *Essex, UK: longman scientific & technical*, 1993.

HASELWANDER, B.; JONAS, W.; RIECH, H. "Material equations for steel fibre reinforced concrete members". *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1-2), 1995, p. 235-248.

HEERSCHE, B.; JARILLO-HERRERO, P.; OOSTINGA, B.; ANDERSYPEN, M.K.; MORPURGO, A.F. "Induced superconductivity in graphene". *Solid State Communications*, 143, 2007, p. 72-76.

<http://www.elmundo.es/elmundo/2012/04/13/nanotecnologia/1334331314.html>, 2012. [Consulta: 12 junio 2018].

<https://www.graphenea.com/>. [Consulta: 12 junio 2018].

<http://2.bp.blogspot.com/-TgdJ3izZCNw/VrKuWMSMnqI/AAAAAAAAADc/AtmWMZT-Hc4/s1600/ccf.jpg>. [Consulta: 12 junio 2018].

<http://2gv.es/reflexiones/grafeno-nuevo-material-para-la-edificacion/>. [Consulta: 12 junio 2018].

<http://es.globedia.com/grafeno-material-milagroso-enciende-carrera-electronica-futuro>. [Consulta: 12 junio 2018].

http://info7rm.blob.core.windows.net/optimalcdn.com/images/2016/11/09/473528_incendio-edificios-boston.jpg. [Consulta: 12 junio 2018].

<http://www.rtve.es/noticias/20130717/patentan-tecnologia-espanola-para-obtener-grafeno-bajo-coste/717260.shtml>. [Consulta: 10 mayo 2018].

<https://www.graphenano.com/wp-content/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>. [Consulta: 1 febrero 2018].

<http://www.solucionesespeciales.net/Index/Noticias/05Noticias/374954-Los-cuatro-tipos-de-hormigon-reforzado-con-fibras.aspx>. [Consulta: 1 febrero 2018].
[Consulta: 16 abril 2017].

https://4.bp.blogspot.com/-3bmruyTQ2LY/VhMDex0thkI/AAAAAAAAIzY/-QDLSxQihwg/s1600/1108297454_850215_0000000000_portadilla_normal.jpg.
[Consulta: 10 mayo 2018].

<https://erenovable.com/que-es-el-grafeno-el-material-del-futuro/>. [Consulta: 12 junio 2018].

<https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-reforzado-con-fibras/>. [Consulta: 1 febrero 2018].

<https://quimica-iti-12-13.wikispaces.com/Descubrimiento+y+repercusión+del+Grafeno>.
[Consulta: 10 mayo 2018].

http://prevencionrimac.com/bitportal/Cms_Data/Contents/RiesgosPatrimonialesDataBase/Media/causa-siniestros/incendio/curvas-de-fuego.png. [Consulta: 9 junio 2018].

HORMIGONES CON FIBRAS. Determinación de la Resistencia a la Primera Fisura, Tenacidad e Índice de Tenacidad a Flexo- Tracción”, Norma Española, España, 1987.

HOSSEINZADEHAB, A.; BIDMESHKIPOURS, S.; ABDI, Y.; ARZI, E.; MOHAJERZADEHC, S. “Graphene based strain sensors: A comparative study on graphene and its derivatives”. *Applied Surface Science*, 448, 2018, p. 71-77.

IRSHIDAT, M.R.; AL-SALEH, M.H. “Flexural strength recovery of heat-damaged RC beams using carbon nanotubes modified CFRP”. *Construction and Building Materials*, 145, 2017, p. 474-482.

JIMÉNEZ MONTOYA, P.; GARCÍA MESEGUER, A.; MORÁN CABRÉ, F. “*Hormigón Armado*. 14ª edición. Ed. Gustavo Gili. Barcelona”, 2000.

JONG-HAN, L.; BAIKSOON, C.; EUNSOO, C. “Contents lists available at ScienceDirect Construction and Building Materials Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content”. *Construction and Building Materials*, 138 (2017), p. 222–231.

JONG-HAN, L. “Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete”. *Composite Structures Volume* 168, 15 2017, p. 216-225.

JOSEFULM, F.; LEMARCHAND, E.; HEUKAMP, F.H. “Elements of chemomechanics of calcium leaching of cement-based materials at different scales”. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, (7–8), 2003, p. 871-889.

KACIANAUSKAS, R.; RAFTOYIANNIS, I. G.; HINDAWI, J.W. "Properties of Concrete at Elevated Temperatures Department of Civil and Environmental Engineering" *Michigan State University*, 2014.

KAKOOEI, S.; AKIL, H.M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures". *Construction and Building Materials*, 27, 2012, p. 73-77.

KALIFA P.; CHENE, G.; GALLE, C. "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres-from spalling to microstructure". *Cement and Concrete Research*, 31 (10), 2001, p. 1487–1499.

KHALIQ, W.; KODUR, V. "High temperature mechanical properties of high strength fly ash concrete with and without fibers". *ACI Materials Journal*, 109 (6), 2012, p. 665-674.

KHALIQ, W.; KODUR, V. "Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures". *Cement and Concrete Research*, 41, 2011, p.1112-1122.

KHOURY, G. A. "Concrete spalling assessment methodologies and polypropylene fibre toxicity analysis in tunnel fires". *Structural Concrete*, 9 (1), 2008, p. 11-18.

KIM, J.; LEE, G.P.; MOON, D.Y. "Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test". *Construction and Building Materials*, 79, 2015, p. 182-191.

KODUR, V.; HARMATHY, T. Z. "Properties of building materials, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering". P. J. DiNenno, Ed., National Fire Protection Association, Quincy, Mass, USA, 2008.

KODUR, V.; DWAIKAT, M.; RAUT, N. "Macroscopic FE model for tracing the fire response of reinforced concrete structures". *Engineering Structures*, 31(10), 2009, p. 2368-2379.

KODUR, V.K.R.; DWAIKAT, M. "A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams". *Cement & Concrete Composites*, 30, 2008, p. 431-443.

KODUR, V. K. R.; PHAN, L. "Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems". *Fire Safety Journal*, 42 (6-7), 2007, p. 482-488.

KODUR, V. K. R.; DWAIKAT, M. "Effect of fire induced spalling on the response of reinforced concrete beams". *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2 (2), 2008, p. 71–82.

KODUR, V.; KHALIQ, W. "Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (6), 2011, p. 793-801.

KODUR, V.; WANG, T.; CHENG, F. "Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns". *Cement and Concrete Composites*, 26 (2), 2004, p. 141-53.

KODUR, V.; RAUT, N. "Performance of concrete structures under fire hazard: emerging trends". *The Indian Concrete Journal*, 84 (2), 2010, p. 23-31.

KODUR, V.; SULTAN, M. A. "Thermal properties of high strength concrete at elevated temperatures," *American Concrete Institute, Special Publication*, 179, 1998, p. 467-480.

KONSTA-GDOUTOS, M.S.; BATIS, G.; DANOGLIDIS, P.A., ZACHAROPOULOU, A.K.; ZACHAROPOULOU, E.K.; FALARA, M.G.; SHAH, S.P. "Effect of CNT and CNF loading and content on the corrosion resistance, conductivity and mechanical properties of nanomodified OPC mortars". *Construction and Building Materials*, 147, 2017, p. 48-57.

KUNPENG, J.; YAJUAN, S.; YANG, C.; JUN, L.; TIANCHUN, Y. "Effects of defects and thermal treatment on the properties of graphene". *Vacuum*, 116, 2015, p. 90-95.

LEONE, M.; CENTONZE, G.; COLONNA, D.; MICELLI, F.; AIELLO, M.A. "Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour". *Construction and Building Materials*, 161 (10), 2018, p. 141-155.

LI, M.; QIAN, C.; SUN, W. "Mechanical properties of high strength concrete after fire". *Cement and Concrete Research*, 34 (6), 2004, p. 1001-1005.

LIN C.; WEI, W.; HU, Y.H. "Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process". *J. Phys. Chem. Solids*, 89, 2016, p. 128-133.

LÓPEZ BUENDÍA, A.M.; ROMERO SÁNCHEZ, M.D.; CLIMENT, V.; GUILLEM, C. "Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*, 54, 2013, p. 29-35.

LU, C.; LU, Z.; LI, Z.; LEUNG, C.K.Y. "Effect of graphene oxide on the mechanical behavior of strain hardening cementitious Composites" *Construction and Building Materials*. 120, 2016, p. 457-464.

LURA, P.; PIETRO TERRASI, G. "Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers. Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete". *Cement & Concrete Composites*, 49, 2014, p. 36-42.

LU, S.N.; XIE, N.; FENG, L.C.; ZHONG, J. "Applications of Nanostructured Carbon Materials in Constructions". *The State of the Art, J. Nanomater*, 2015, p.1-10.

LV, S.; LIU, J.; SUN, T.; MA, Y.; ZHOU, Q. "Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process". *Construction and Building Materials*, 64, 2014, p. 231-239.

LV, S.; MA, Y.; QIU, C.; SUN, T.; LIU, J.; ZHOU, Q. "Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement Composites". *Construction and Building Materials*, 49, 2013, p.121-127.

MACÍAS MESA, J.A.; DE LOURDES ARTOLA, M.P.; HERNÁNDEZ RAMOS, P. J. "Utilización de fibras en hormigones".

MARIMON, F. "DR. Ingeniero Industrial Profesor del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. E.T.S Ingenieros Industriales de Barcelona Universidad Politécnica de Cataluña". *JORNADA TÉCNICA CÁTEDRA G.O.C Universidad de Vigo*, 2007.

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. "The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages". *Composites Part B: Engineering*; Volume 112, 2017, p. 74-92.

MASTALI, M.; DALVAND, A. "The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces". *Composites Part B: Engineering*, 92, 2016, p. 360-376.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", 2006.

MERCHÁN GABALDÓN, F. "Manual para la inspección técnica del edificio (I.T.E)", *Editorial CIE-dossat*, 2000.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. "Concrete, Pearson Education, Upper Saddle River". NJ, USA, 2003.

MINISTERIO DE FOMENTO. Instrucción para el hormigón estructural (EHE-08). Con comentarios de la Comisión Permanente del Hormigón, 4ª Ed. Madrid., 2010. Instrucción de Hormigón Estructural EHE. Anejo 14.

MOHAMMED, A.; SANJAYAN, J.G.; DUAN, W.H.; NAZARI, A. "Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties". *Construction and Building Materials*, 84, 2015, p.341-347.

MO, H.K.; YEO, H. K.; BASHAR, I. H.; ALENGARAM, J. U.; UMAAT, Z.J. "Shear behaviour and mechanical properties of steel fibre-reinforced cement-based and geopolymer oil palm shell lightweight aggregate concrete". *Construction and Building Materials* Volume, 148 (1), 2017, p. 369-375.

MORSY, M.S.; ALSAYED, S.H.; AQEL, M. "Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar". *Construction and Building Materials*, 25 (1), 2011, p. 145-149.

NGUYEN, D.L.; RYU, G. S.; KOH, K.T.; KIM, D.J. "Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete". *Composites*, 58, 2014, p. 279-292.

NOUMOWE, A. N.; SIDDIQUE, R.; DEBICKI, G. "Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C)". *Construction and Building Materials*, 23, 2009, p. 1855-1861.

NOUMOWE, A. "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C". *Cement and Concrete Research*, 35 (11), 2005, p. 2192-21.

ORTÍZ, J. "Los diez libros de arquitectura de M. Vitruvio Polión". *Imprenta Real, Madrid*, 1787.

PEYVANDI, A.; SBIA, L.A.; SOROUSHAN, P.; SOBOLEV, K. "Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite". *Constr. Build. Mater*, 48, 2013, p. 265-269.

PHAN, L. T. "Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art". *Tech. Rep., National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg*, 1996.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; ESMAEILI, M.; GHAHARI, S.A.; NAJAFI, M.H. "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers". *Construction and Building Materials*, 44, 2013, p. 411-418.

RANJBAR, N.; MEHRALI, M.; MEHRALI, M.; ALENGARAM, U.J.; ZAMIN JUMAAT, M. "High tensile strength fly ash based geopolymer composite using copper coated micro steel fiber". *Construction and Building Materials*, 112, 2016, p. 629-638.

RING, T.; ZEIML, M; LACKNER, R.; "Underground concrete frame structures subjected to fire loading: part I – large-scale fire tests. "Engineering structures", 58, 2014, p.175-187.

RC-08. *Instrucción para la recepción de cementos. Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del cemento*. Secretaría Técnica.

ROMUALDI, J. P.; MANDEL, J.A. "Tensile Strenght of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengt of Wire Reinforcement", *Journal of the Americal Concrete Institute, Proceedings*, 61 (6), 1964, p. 657-671.

SÁNCHEZ J.L.; COBO, A.; DÍAZ, B.; MATEOS, I. "Experimental study of performance selfcompacting concrete reinforced with steel fibers". *Anales de Edificación*, 1-2, 2015, p.17-26.

SASMAL, S.; RAVIVARMAN, N.; B.S. SINDU, K.VIGNESH. "Electrical conductivity and piezo-resistive characteristics of CNT and CNF incorporated cementitious nanocomposites under static and dynamic loading". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100, 2017, p. 227-243.

SEKHAR, C.R. "Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials". A volume in *Micro and Nano Technologies*, 2015, p.1-38.

SHIN, K.Y.; KIM, S.B.; KIM, J.H.; CHUNG, M.; JUNG, P.S. "Thermo physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures". *Nuclear Engineering and Design*, 212 (1-3), 2002, p. 233-241.

SIDDIQUE, R.; MEHTA, A. "Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars". *Construction and Building Materials*, 50, 2014, p.116-129.

SOLEDAD CARBEL, E. "Estudio del comportamiento en zonas sísmicas del hormigón pretensado con refuerzo de fibras". *Anales de Edificación*, 2 (3), 2016, p. 20-25.

SOBOLKINA, A.; MECHTCHERINE, V.; KHAVRUS, V.; MAIER, D.; MENDE, M.; RITSCHER, M.; LEONHARDT, A. "Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix". *Cem. Concr. Compos*, 34 (10), 2012, p.1104-1113.

SWAMY, R.N. "Progress in Fibre Reinforced Concrete", Inglaterra, 1973.

TAILHAN, J.; ROSSI, P.; DAVIAU-DESNOYERS, D. "Probabilistic numerical modelling of cracking in steel fibre reinforced concretes (SFRC) structures". *Cement and Concrete Composites*, 55, 2015, p. 315-321.

TANG, W. C.; LO, T. Y. "Mechanical and fracture properties of normal-and high-strength concretes with fly ash after exposure to high temperatures," *Magazine of Concrete Research*, 61, (5), 2009, p. 323-330.

TEODORO, P. R.; HALLAK, T.; TEIXEIRA, R.; CHRISTOFORO, A. L. "Apparent shear strength of hybrid glass fibre reinforced composite joints". *Polymer Testing*, 64, 2017, p. 307-312.

TYSON, B.M.; ABU AL-RUB, R.K.; YAZDANBAKHSH, A.; GRASLEY Z. "Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers for Enhancing the Mechanical Properties of Nanocomposite Cementitious Materials". *J. Mater. Civ. Eng.* 23, 2011, p.1028-1035.

UYSAL, M.; TANYILDIZI, H. "Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network". *Construction and Building Materials*, 27, 2012, p. 404-414.

VEGA CATALÁN, L.; BURÓN, M. "Seguridad frente al fuego de las estructuras de hormigón". *Editorial Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja*. 899, 2007, p. 44-51.

VEGA, G. "Revisión del empleo de fibras de acero en hormigones autocompactantes". *Anales de Edificación*, 2 (3), 2016, p. 41-51.

VERA, J.; CHOZAS, V.; PORTILLO, D.; GARCÍA, M.J.; GUTIÉRREZ, A.; MIERES, J.M.; GRÁVALOS, J. "Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials". *Nanotechnology in Construction* 3, 2009, p. 383-388.

YAP, S.P.; BU, C.H.; ALENGARAM, U.J.; HUNG MO, K.H.; JUMAAT, M.Z. "Flexural toughness characteristics of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete". *Materials and Design*, 57, 2014, p. 652-659.

YEOU, F.; CHIEN, T.; RONG-JONG, W. "Facile synthesis of graphene sheets for heat sink application". *Solid State Sciences*, 43, 2015, p. 22-27.

YOUNG-SUN, H.; SANJAYAN, J.G.; CHEON-GOO, HAN; MIN-CHEOL, H. "Construction and Building Materials Construction application of Fibre/Mesh method for protecting concrete columns in fire". *Construction and Building Materials*, 25, 2011, 2928-2938.

YU, X.; ZHA, X.; HUANG, Z. "The influence of spalling on the fire resistance of RC structures". *Advanced Materials Research*, 255–260, 2011, p. 519-523.

ZHU, X. ; GAO, Y.; DAI, Z.; CORR, D. J.; SHAHB, S. P. "Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete". *Cement and Concrete Research*, 107, 2018, p. 49-63