

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ICITECH

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón

Programa de doctorado en Ingeniería de la Construcción



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**Análisis experimental del comportamiento frente
a altas temperaturas de vigas planas mixtas de
acero-hormigón con materiales avanzados**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D. Enrique Serra Mercé

DIRIGIDA POR:

Dr. Manuel L. Romero García

Dra. Ana Espinós Capilla

Dr. Vicente Albero Gabarda

Para el cumplimiento parcial de los requisitos para la obtención del título de doctor.

Valencia, septiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS

Mi inscripción a esta tesis surge como una solución a mi necesidad laboral que me hizo entrar al apasionante ecosistema de la I+D+i. Descubrí un mundo de personas que lo ponen todo en su trabajo, de forma que es una gran parte de su vida. Y junto a esto, me han dedicado su tiempo y su energía.

Quiero agradecer a Manuel Romero, desde mis inicios en la UPV como mi jefe y tutor, por su forma de liderar y de enseñar, clara y orientada a los objetivos, de forma que me han ayudado a alcanzar estas metas profesionales y académicas tan elevadas.

Agradecer también a mis compañeros de equipo en la investigación, en especial a Ana Espinós porque al cotutorizar mi tesis me ha inculcado desde su ejemplo competencias necesarias para un doctorando, el rigor, el método, el enfoque. Gracias a Vicente Albero por su simpatía, por aclarar dudas y situaciones personales que me surgieron, por ofrecer altruistamente tiempo familiar para ayudarme. Y agradezco el trabajo del equipo a Antonio Hospitaler, Andrés Lapuebla, Carmen Ibáñez y David Pons por su consejo, apoyo y amistad.

Agradecer la ayuda desinteresada recibida de Vicente Moliner, la termografía del profesor Rafael Royo y los sensores de José Manuel Navarro.

Agradecer al ICITECH por proporcionar las instalaciones y espacios necesarios. Así como por los laboratorios, el de materiales a la ETSIE y el de estructuras a la ETSII.

Agradecer a los financiadores de esta tesis doctoral: el Ministerio de Economía y Competitividad” a través del proyecto BIA2015-67492-R y la ayuda para contratos predoctorales para la formación de doctores BES-2016-076441, y por parte de la Unión Europea a través de los fondos FEDER.

Agradecer a algunas empresas que con su aportación han hecho más fácilmente viable esta investigación. Así doy gracias por: las prelosas de Hermo, los cementos de LafargeHolcim, los áridos cerámicos de Arlita, los materiales aislantes ignífugos de Promat y de Morgan Advanced Materials.

Para el final, mi vida ha seguido un rumbo muy cambiante y en ocasiones inestable y, si he conseguido continuar, ha sido por y gracias a mi familia, por su cariño incondicional.

Y doy gracias a Dios por lo que soy y donde me ha llevado.

RESUMEN

Las vigas mixtas de acero y hormigón embebidas en el forjado, *slim-floor*, están siendo cada vez más utilizadas a nivel internacional en las nuevas propuestas de edificación tanto residencial, industrial o comercial, así como en infraestructuras singulares. Sin embargo, los códigos de diseño actuales aplicables en Europa, presentan algunas carencias. Una de las más importantes es respecto a su diseño para resistencia al fuego, para el que no existe una guía clara.

Por otra parte, algunos aceros especiales, como los aceros inoxidables (SS) o de alta resistencia (HSS), están empezando a comercializarse a nivel internacional. El empleo de estos aceros, en combinación con la utilización de hormigones ligeros de menor difusividad térmica, puede llegar a incrementar significativamente la resistencia frente al fuego de este tipo de vigas sin necesidad de utilizar una protección externa, reduciendo así, a la vez, la huella de carbono.

En esta tesis se sugiere la utilización de una tipología particular de sección (HEB + chapa inferior soldada) que mejora la seguridad de los sistemas de viga mixta actuales, permitiendo disponer diferentes tipos de aceros en la sección. Pueden utilizarse aceros normales (S275 o S355) en el perfil principal, mientras que los aceros de altas prestaciones se dispondrían preferentemente en la parte inferior de la sección. Esto permitiría contrarrestar los problemas de pérdida de resistencia frente a altas temperaturas que presentan estas vigas, reduciendo a la vez su coste.

Para ello, se desarrolla una campaña de experimentos con ocho ensayos, donde se analiza en detalle la distribución de temperaturas cuando se somete a las vigas mixtas a la acción del fuego. Posteriormente, se presenta una solución innovadora originada durante el estudio de los resultados de los primeros experimentos, que consiste en la interposición de un material de aislamiento térmico en el hueco generado entre el perfil de acero y la chapa inferior (patente P201930438). Para demostrar su novedad, se desarrolla una segunda campaña de ensayos, más reducida.

Se puede concluir que las vigas mixtas que se plantean en la presente tesis son soluciones sostenibles, innovadoras y competitivas para edificación residencial, industrial o comercial. El uso de perfiles de acero embebidos propuesto en esta tesis se plantea como una alternativa frente al empleo de soluciones clásicas de protección pasiva (pinturas intumescentes o morteros de proyección), proporcionando una solución con un mejor acabado externo y sin necesidad de mantenimiento durante su vida en servicio, lo cual redonda en la reducción del impacto ambiental asociado.

ABSTRACT

Composite steel-concrete beams embedded in the slab (slim-floor) are being increasingly used worldwide in new residential industrial and commercial building projects, as well as in unique infrastructures. However, the current standard design codes applicable in Europe, present several shortcomings. One of the most significant limitations is related to the calculation under fire exposure, where there is a lack of clear design guidance.

In addition, many high-performance steels are beginning to be commercialized internationally. The use of these steels, in combination with the use of lightweight concrete with lower thermal conductivity, may significantly increase the fire resistance of this type of beams without the need of using an external protection, hence reducing the carbon footprint at the same time.

This thesis suggests the use of a particular section typology (HEB + welded bottom plate) that improves the safety of the current composite beam systems, allowing for different types of steels to be arranged in the section. Plain carbon steels (S275 or S355) can be used for the main profile, while the high-performance steels (HSS or SS) would be employed only on the lower part of the beam. This will allow to balance out the problem of loss of resistance that these beams present when exposed to elevated temperatures, while reducing their cost.

To this aim, a first experimental campaign is developed through eight tests, where the distribution of temperatures is analyzed in detail, as the composite beams are being subjected to the action of fire. Subsequently, an innovative solution, originated during the study of the results of this first group of experiments, is produced. This innovation is based on the insertion of an insulating material in the gap generated between the steel profile and the bottom plate (patent P201930438). To prove its novelty, a second and more reduced experimental campaign was developed.

It can be concluded that some of the composite beams configured in this thesis are more sustainable, innovative, and provide competitive solutions for residential, industrial or commercial buildings. The use of new materials in embedded steel profiles is proposed in this thesis, as an alternative to the use of classical fire protection solutions (intumescent coatings or sprayed mortars), providing a solution with a better external finish and without the need for maintenance during its service life, which results in the reduction of the associated environmental impact.

RESUM

Les bigues mixtes acer-formigó embegudes en el forjat, *slim-floor*, són cada vegada més utilitzades a nivell internacional en les noves propostes d'edificació tant residencial, industrial, comercial, com d'infraestructures singulars. No obstant això, els codis de disseny actuals aplicables a Europa, presenten diverses manques. Una de les més importants és respecte al dimensionament enfront el foc, on no existeix una guia de disseny clara

D'altra banda, la utilització d'acers especials, com els acers inoxidable (SS) o d'alta resistència (HSS) estan començant a comercialitzar-se a nivell internacional. L'ús d'aquests acers en combinació amb la utilització de formigons lleugers de menor conductivitat, pot arribar a incrementar significativament la resistència al foc d'aquest tipus de bigues sense la necessitat d'utilitzar protecció externa, reduint alhora la petjada de carboni.

En aquesta tesi es proposa la utilització d'una tipologia de secció mixta (HEB + xapa inferior soldada) que millora la seguretat dels sistemes actuals, permetent disposar diferents tipus d'acers en la secció, els acers comuns (S275 o S355) en el perfil principal i els acers especials només en la part inferior. Això permetria contrarestar els problemes de pèrdua de resistència enfront d'altres temperatures que presenten aquestes bigues reduint alhora el seu cost.

Per a això es desenvolupa una campanya experimental amb huit assajos on s'analitza detalladament la distribució de temperatures sota l'acció del foc. Posteriorment, es presenta una solució innovadora originada durant l'estudi dels resultats de la primera campanya experimental i que consisteix en la interposició d'un material protector en el buit generat entre el perfil i la xapa d'acer (patent P201930438). Per a demostrar la seua novetat, es desenvolupa una segona campanya experimental més reduïda.

Es pot concloure que, les bigues mixtes que es plantegen en el present projecte són solucions sostenibles, innovadores i competitives per a edificació residencial, industrial o comercial. L'ús de perfils d'acer embeguts proposat en aquesta tesi es planteja com una alternativa enfront de l'ús de solucions clàssiques (pintures intumescentes o morters de projecció), proporcionant una solució amb un millor acabat extern i sense necessitat de manteniment durant la seua vida en servei, la qual cosa reduna en la reducció de l'impacte ambiental associat.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	21
1.1. INTRODUCCIÓN.....	23
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS.	23
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	23
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	24
1.2.3. <i>Alcance de la Tesis</i>	24
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	25
CAPÍTULO 2. LAS VIGAS PLANAS MIXTAS ACERO-HORMIGÓN	27
2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE VIGAS PLANAS MIXTAS ACERO-HORMIGÓN.	29
2.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES EN EL USO DE VIGAS PLANAS MIXTAS.	34
2.3. COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO DE LAS VIGAS PLANAS MIXTAS.	37
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE	43
3.1. REVISIÓN HISTÓRICA.	45
3.2. ENSAYOS EXPERIMENTALES DE RESISTENCIA AL FUEGO DE VIGAS SLIM-FLOOR.	46
3.3. CONCLUSIONES ESTADO DEL ARTE.....	52
CAPÍTULO 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
4.1. DISEÑO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	57
4.2. FABRICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO.	61
4.2.1. <i>Viga de acero estructural</i>	61
4.2.2. <i>Pletinas de acero</i>	62
4.2.3. <i>Hormigón de relleno</i>	62
4.2.4. <i>Entrevigado</i>	72
4.2.5. <i>Armaduras</i>	75
4.2.6. <i>Soldadura</i>	75
4.3. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO.	76
4.3.1. <i>Ensayo A0</i>	76
4.3.2. <i>Ensayo A1 (Referencia)</i>	77
4.3.3. <i>Ensayos A2 y A3</i>	77
4.3.4. <i>Ensayo A4</i>	79
4.3.5. <i>Ensayos A5, A6 y A7</i>	80
4.3.6. <i>Ensayo A1vA3</i>	82
4.4. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYO Y SENSORES.	84

4.4.1. Horno de Ensayos.	84
4.4.2. Medida de temperatura de las muestras de ensayo.	90
4.4.3. Adquisición de datos.....	93
4.5. CONDICIONES DE LOS ENSAYOS.	95
4.5.1. Instalación de las muestras de ensayo.	95
4.5.2. Instrumentación.....	97
4.5.3. Desarrollo del ensayo a altas temperaturas.....	100
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	103
5.1. ANÁLISIS DE TERMOPARES.....	105
5.2. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.	111
CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE SOLUCIÓN INNOVADORA	117
6.1. LA VIGA MIXTA <i>SLIM-FLOOR</i> CON PROTECCIÓN INHERENTE AL FUEGO.	119
6.2. VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A TEMPERATURA AMBIENTE	122
6.3. ENSAYOS A ALTAS TEMPERATURAS	125
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	131
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	135
ANEXO. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	141

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1.- TIPOLOGÍA DE SECCIONES DE PERFILES METÁLICOS EMPLEADAS EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX [8].	30
FIGURA 2-2 EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE VIGAS MIXTAS: A) NUEVA GALERÍA KONS, LUXEMBURGO M3 ARCHITECTES. B) ING BUILDING. MEYER & VAN SCHOOTEN, ARUP, ARONSOHN.	31
FIGURA 2-3 DIVERSOS TIPOS DE SECCIONES ACTUALES DE VIGAS METÁLICAS EMBEBIDAS EN EL FORJADO [11].	32
FIGURA 2-4. SECCIONES TIPO IFB [13].	33
FIGURA 2-5. SECCIÓN TIPO SFB [13].	33
FIGURA 2-6. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN UNA VIGA IFB EXPUESTA A FUEGO.	38
FIGURA 2-7. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS PROPUESTA POR EL ECCS [20]	38
FIGURA 2-8. DILATACIÓN DE LA CHAPA Y FORMACIÓN DE HUECO EN CASO DE INCENDIO, [21]	39
FIGURA 2-9. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN UNA VIGA SFB EXPUESTA A FUEGO Y CAMPO DE TENSIONES SECCIONAL [17].	40
FIGURA 2-10. ESQUEMA DE CÁLCULO DE FUERZAS EN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SFB [17].	41
FIGURA 3-1. ESQUEMAS DE SLIM-FLOOR ANALIZADAS EN [31].	47
FIGURA 3-2. ESQUEMAS DE SLIM-FLOOR ANALIZADAS EN [32] (ARRIBA) Y [33] (ABAJO).	48
FIGURA 3-3. DETERIORO DE PINTURAS INTUMESCENTES EN PERFIL HEB.	50
FIGURA 4-1. ESQUEMA DE SLIM-FLOOR PATRÓN. (COTAS EN MM)	59
FIGURA 4-2 GRANULOMETRÍA DE LA ARENA EMPLEADA EN LA ELABORACIÓN DEL H30 Y HL30.	63
FIGURA 4-3 GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA 4-7 EMPLEADA EN LA ELABORACIÓN DEL H30.	64
FIGURA 4-4 GRANULOMETRÍA DE LA GRAVA M7-12 EMPLEADA EN LA ELABORACIÓN DEL H30.	65
FIGURA 4-5 GRANULOMETRÍA DEL ARIDO CERÁMICO EMPLEADO EN LA ELABORACIÓN DE HL30.	65
FIGURA 4-6 PREPARACION DE MATERIALES (IZQ.) PREPARACIÓN DE LA AMASADORA (DER.)	67
FIGURA 4-7 VERTIDO DE HORMIGÓN (IZQ.) VISTA AMASADORA ORBITAL (DER.)	67
FIGURA 4-8 VIGA HORMIGONADA Y FRATASADA, (IZQ.) RELLENO DE MOLDES (DER.)	68
FIGURA 4-9 DETALLE Y VISTA GENERAL DEL EQUIPO DE REFRENTADO.	70
FIGURA 4-10 DETALLES DE LAS DEMOLICIONES DE VIGAS ENSAYADAS.	72
FIGURA 4-11 IMÁGENES DE LAS LOSAS DE ALVEOLARES P20*120 SUMINISTRADAS POR LA EMPRESA HERMO S.L.	73
FIGURA 4-12 PRELOSAS Y VIGA DE ACERO PREPARADA PARA HORMIGONAR.	74
FIGURA 4-13 DETALLE DE LAS POSICIONES DE LAS ARMADURAS EN LA VIGA (IFB).	75
FIGURA 4-14 SOLDADURA POR TRAMOS ALTERNOS DE UNA VIGA SFB.	76
FIGURA 4-15 ENSAYO CON SFB SIN HORMIGÓN.	77
FIGURA 4-16 VIGA PATRÓN A1.	77
FIGURA 4-17 VIGA A2.	78

Índice de figuras

FIGURA 4-18 SECCIÓN DE LA VIGA A2. TIPO SFB. (COTAS EN MM).....	78
FIGURA 4-19 SECCIÓN DE LA VIGA A3. TIPO IFB. (COTAS EN MM)	79
FIGURA 4-20 VIGA MIXTA A3. (IFB)	79
FIGURA 4-21 VIGA A4 TIPO SFB RELLENO CON HL30.....	80
FIGURA 4-22 VIGA A5 CON CHAPA DE ACERO INOXIDABLE.	81
FIGURA 4-23 VIGA A6 PROTEGIDA CON PINTURA INTUMESCENTE.....	81
FIGURA 4-24 SECCIÓN DE LA VIGA A7. TIPO SFB. (COTAS EN MM)	82
FIGURA 4-25 SECCIÓN DE VIGA DELGADA INTEGRADA EN FORJADO. ENSAYO A7.	82
FIGURA 4-26 SECCIÓN DEL HORNO DURANTE EL ENSAYO A1VA3.	83
FIGURA 4-27 ENSAYO PREPARADO. ENSAYO A1VA3.	84
FIGURA 4-28 CONFIGURACIÓN ORIGINAL DEL HORNO DE ENSAYOS.	85
FIGURA 4-29 NUEVA DISPOSICIÓN DE LA CÁMARA DEL HORNO.....	86
FIGURA 4-30 PLANO DE PLANTA DEL HORNO CONSTRUIDO PARA LOS ENSAYOS.....	87
FIGURA 4-31 PLANO DE SECCIÓN LONGITUDINAL DEL HORNO DURANTE EL ENSAYO DE UNA VIGA. .	88
FIGURA 4-32 PLANO DE SECCIÓN TRANSVERSAL DEL HORNO CONSTRUIDO PARA LOS ENSAYOS.	89
FIGURA 4-33 FOTOGRAFÍA EXTERIOR DE UNO DE LOS ENSAYOS.	90
FIGURA 4-34 PLANO DE UBICACIÓN DE TERMOPARES EN LA SECCIÓN CENTRAL. SECCIÓN SFB.	91
FIGURA 4-35 PLANO DE UBICACIÓN DE TERMOPARES EN LA SECCIÓN CENTRAL. SECCIÓN IFB.	91
FIGURA 4-36. COLOCACIÓN DE TERMOPARES DE CONTROL DE EMISORES EN EL HORNO.....	92
FIGURA 4-37 DISPOSICIÓN DE TERMOPARES DE PLACA PARA HORNO.....	93
FIGURA 4-38. VISTA EXTERIOR DEL ENSAYO.....	94
FIGURA 4-39. COLOCACIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO EN EL HORNO.	96
FIGURA 4-40.PREPARACIÓN ENSAYO A1.	97
FIGURA 4-41.PREPARACIÓN DEL ENSAYO. COLOCACIÓN DEL RELOJ COMPARADOR DE POSICIÓN. ..	98
FIGURA 4-42. UBICACIÓN DE TERMOPARES INTERIORES.....	99
FIGURA 4-43. UBICACIÓN DE LOS TERMOPARES DE PLACA.....	99
FIGURA 4-44. SISTEMA DE CONTROL DE HORNO Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE TEMPERATURAS. ..	100
FIGURA 4-45. EXUDACIÓN DE VAPOR Y GOTEJO DE AGUA DURANTE EL ENSAYO.	101
FIGURA 5-1 RESULTADOS DE LECTURAS DE TERMOPARES: ENSAYOS DE A1 A A7 Y A1VA3.	108
FIGURA 5-2 TEMPERATURA REGISTRADA EN EL HORNO, TP1 A TP4. ENSAYO A1.	109
FIGURA 5-3 EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL HORNO. ENSAYOS A1 A A7.	109
FIGURA 5-4 PERFILES DE TEMPERATURA PARA EL ENSAYO A1.	111
FIGURA 5-5 COMPARACIÓN ENSAYOS A1-A2.....	112
FIGURA 5-6 COMPARACIÓN ENSAYOS A1-A4.....	113
FIGURA 5-7 COMPARACIÓN ENSAYOS A1-A5.....	114
FIGURA 5-8 COMPARACIÓN ENSAYOS A1-A6.....	114
FIGURA 5-9 REACCIÓN DE LA PINTURA INTUMESCENTE. ENSAYO A6.	115

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas acero-hormigón con materiales avanzados.

FIGURA 5-10 COMPARACIÓN ENSAYOS A1-A7.	115
FIGURA 6-1 VIGA MIXTA SLIM-FLOOR CON PROTECCIÓN INHERENTE AL FUEGO.....	120
FIGURA 6-2 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LA VIGA SLIM-FLOOR PROPUESTA.....	121
FIGURA 6-3 CONFIGURACIÓN DE ENSAYO DE FLEXIÓN A CUATRO PUNTOS.	123
FIGURA 6-4 RESULTADOS FUERZA – DESPLAZAMIENTO.	124
FIGURA 6-5 DISTRIBUCIÓN DE DEFORMACIONES A LO LARGO DE LA SECCIÓN.....	125
FIGURA 6-6 ENSAYOS A9 Y A10.....	126
FIGURA 6-7 RESULTADOS DE LECTURAS DE TERMOPARES. ENSAYOS A9 Y A10.....	127
FIGURA 6-8 TEMPERATURAS EN A1, A9 Y A10.	128

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4-1. VALORES DE DISEÑO DE LA VIGA PATRÓN	58
TABLA 4-2. RELACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS EN LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	59
TABLA 4-3. DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES EXPRESADA EN KG/M^3	66
TABLA 4-4. TIEMPOS EN MINUTOS DURANTE EL PROCESO DE AMASADO.....	68
TABLA 4-5. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA LAS PROBETAS CILÍNDRICAS ENSAYADAS DE 15x30CM.	70
TABLA 5-1 RESULTADOS DE TERMOPARES: ENSAYOS A1 A A7 Y A1VA3.....	110
TABLA 6-1 ENSAYOS A9 Y A10.	125
TABLA 6-2 RESULTADOS DE TERMOPARES. ENSAYOS A9 Y A10	127

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

SS	Acero inoxidable (<i>Stainless Steel</i>)
HSS	Acero de alta resistencia (<i>High Strength Steel</i>)
IFB	Viga integrada en forjado (<i>Integrated Floor Beam</i>)
SFB	Viga de forjado plano (<i>Shallow Floor Beam</i>)

NOMECLATURA Y SÍMBOLOS

f_{ck}	Valor de la resistencia característica especificada del hormigón a compresión según la EHE-08.
f_y	Límite elástico del acero estructural a temperatura ambiente.
$F_{i,\theta}(t)$	Fuerza que desarrolla cada parte a una determinada temperatura en un momento determinado.
A_i	Superficie de la sección cada componente.
$k_{i,\theta}$	Coefficiente de reducción de la resistencia de un material para una temperatura dada.
f_i	Resistencia de cálculo o de un material.
$M_{(f_i,R_d)}(t)$	Momento que es capaz de resistir una sección en un momento determinado.
z_i	Distancia de la base al centro de gravedad de cada parte en el cálculo del momento resistente.
θ	Temperatura.

Capítulo 1. Introducción y Objetivos

En este capítulo se exponen los objetivos que justifican la elaboración de esta tesis doctoral. Asimismo, se define el alcance y la estructura de la misma.

1.1. Introducción.

La construcción mixta a base de elementos acero-hormigón está siendo cada vez más demandada a nivel mundial, principalmente en aplicaciones donde se requiere lograr una gran capacidad de carga con una sección reducida por razones estéticas o funcionales, como en las construcciones de gran altura, auditorios, terminales de aeropuertos etc.

Sin embargo, el desconocimiento de esta tecnología, por un lado, y por otro la falta de reglas prácticas de diseño que faciliten al calculista su dimensionado, hacen que los proyectistas descarten la estructura mixta como primera opción, en favor de la construcción tradicional con hormigón o acero.

Existe por tanto una necesidad de acercar al proyectista a este tipo de soluciones mixtas, que consiguen un uso más racional de los recursos, al combinar las ventajas del acero y hormigón trabajando conjuntamente en la sección.

Por otro lado, la exigencia estructural de seguridad en caso de incendio hace necesario desarrollar soluciones que permitan garantizar la resistencia frente al fuego de la estructura, siendo éste uno de los objetivos a perseguir con las secciones mixtas propuestas en la tesis, las cuales lograrían prolongar el tiempo de resistencia al fuego de los forjados de forma inherente sin necesidad de dotarlas de protección externa, redundando en última instancia en un beneficio a nivel de seguridad para la sociedad.

Las vigas mixtas que se proponen en la tesis son una alternativa al uso de materiales intumescentes o proyectados, consiguiendo un mejor acabado externo y evitando el mantenimiento durante su vida útil.

1.2. Objetivos y Alcance de la Tesis.

1.2.1. Objetivo general

Esta tesis tiene como objetivo general investigar experimentalmente el comportamiento térmico frente a altas temperaturas de las vigas planas embebidas en el forjado con diferentes tipologías, así como la utilización de materiales de características especiales.

Se pretende ensayar térmicamente este sistema constructivo, y precisar de qué forma particular pueden ser más eficientes los materiales tradicionalmente usados frente a materiales algo más innovadores.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se plantean en la presente tesis doctoral pueden concretarse en los siguientes puntos:

1. Revisión, análisis y evaluación bibliográfica del estado actual del conocimiento sobre vigas planas mixtas acero-hormigón embebidas en el forjado. Por un lado, en lo referente a los ensayos experimentales realizados para evaluar el comportamiento de dichas secciones mixtas expuestas a elevadas temperaturas, y por otro para diseñar y determinar nuevas tipologías todavía no estudiadas.
2. Diseño del ensayo experimental del comportamiento térmico a elevada temperatura, y construcción del equipo que permita evaluar la influencia de su comportamiento térmico con diferentes secciones de viga y diferentes materiales.
3. Análisis de los resultados de la campaña experimental de acuerdo con la variación de parámetros definida para cada ensayo.
4. Propuesta de una tipología de sección innovadora que permita aumentar la resistencia al fuego, sin necesidad de utilizar protección externa y así evitar el mantenimiento de la sección.

1.2.3. Alcance de la Tesis

Debido al limitado equipamiento disponible en la Universitat Politècnica de València, el alcance de esta tesis se limita a evaluar el comportamiento térmico frente a altas temperatura de vigas planas mixtas acero-hormigón con materiales avanzados.

Se ha demostrado que para vigas arriostradas lateralmente existe una relación directa entre la distribución de temperaturas en la sección y la capacidad resistente a flexión. Se deja para futuras investigaciones la ejecución de ensayos experimentales termo-mecánicos bajo carga de flexión, ya que requieren de un horno de gran tamaño acoplado a un pórtico para la aplicación de la carga.

Por otra parte, si bien el campo de aplicación de este trabajo incluye: secciones con un solo material, vigas mixtas con medio IPE y vigas con diferentes soluciones de protección frente a altas temperaturas, en cualquier caso, la tesis se centra en vigas tipo HEB de acero con una pletina soldada paralela a su ala inferior embebidas en

hormigón, por ser este el sistema constructivo que responde con un mejor comportamiento térmico.

1.3. Estructura de la tesis

La presente tesis doctoral se estructura en ocho capítulos. El primer capítulo presenta la introducción y los objetivos generales así como particulares de la tesis. El segundo capítulo se centra en describir las vigas mixtas acero-hormigón, estableciendo los fundamentos para el análisis de su comportamiento frente a un incendio. A continuación, el capítulo 3 estudia el estado actual del conocimiento en este campo, a través de un estudio bibliográfico de las investigaciones experimentales realizadas hasta el momento.

El capítulo 4 hace referencia al programa experimental, describiendo la campaña de ensayos llevada a cabo, los medios disponibles para su ejecución y la metodología desarrollada. En el capítulo 5, se analizan los resultados obtenidos acerca de la respuesta térmica de las diferentes soluciones estudiadas, derivados del desarrollo de la campaña experimental.

A continuación, el capítulo 6 presenta una propuesta innovadora de sección mixta que posee la ventaja de incluir la protección frente al fuego de forma inherente, evitando así la aplicación exterior de pinturas o morteros. La propuesta es validada a través de ensayos experimentales.

La parte de conclusiones y desarrollos futuros viene reflejada en el capítulo 7, que recoge las reflexiones obtenidas a partir del estudio realizado en esta tesis, planteando algunas ideas que permitan dar continuidad a esta línea de investigación.

Complementa el documento el capítulo 8, donde se listan las referencias bibliográficas citadas a lo largo del presente documento, se incluye como anexo un listado de la productividad científica de la tesis, comprendiendo los artículos publicados en revistas indexadas y comunicaciones a congresos elaborados en el marco de esta investigación.

Capítulo 2. Las vigas planas mixtas acero-hormigón

Este capítulo describe la tipología de vigas planas mixtas acero-hormigón *slim-floor*, detallando sus principales ventajas e inconvenientes. Se establecen además los fundamentos para el análisis del comportamiento frente al fuego de este tipo de vigas mixtas, considerando la evaluación de su resistencia a altas temperaturas a través de métodos experimentales.

2.1. Evolución histórica de vigas planas mixtas acero-hormigón.

En el campo de la construcción, una viga es un elemento estructural horizontal, destinado fundamentalmente a recibir cargas y transmitir las a los elementos verticales, y que, por tanto, trabaja bajo esfuerzos de flexión principalmente.

A lo largo del tiempo se han utilizado toda clase de materiales para la fabricación de las vigas, desde rocas o troncos a todo tipo de metales y de aleaciones con hierro que, dependiendo de los avances alcanzados en el lugar, el tiempo de la construcción, la economía, la disponibilidad de materias primas, el uso del edificio, y otros aspectos, han servido para la construcción de espacios cubiertos. Aún con todo lo precedente, los materiales más universalmente empleados en la actualidad para la fabricación de vigas, por razones de: disponibilidad de materiales, economía, capacidad resistente y rapidez de ejecución son el hormigón y el acero [1] gracias a los avances científicos y tecnológicos.

La clave de la universalidad y la economía están también ligados a la cantidad disponible de los materiales. Los minerales que contienen hierro están ampliamente distribuidos por toda la superficie terrestre y han sido utilizados desde hace más de 5000 años en diferentes civilizaciones [2]. A medida que los avances en la construcción de hornos y las técnicas permitieron conseguir unas características de ductilidad y tenacidad aceptables, las aleaciones con hierro fueron más fácilmente obtenibles y por tanto más económicas. Así mismo cada vez se podían producir mayores cantidades, pasando de ser un material muy exclusivo, a poder ser utilizado en todo tipo de herramientas y artefactos, hasta que llegado un momento pasó a ser empleado en la construcción, inicialmente a modo de refuerzos [3, 4] y más tarde en elementos estructurales; primero en edificios singulares y finalmente en todo tipo de construcciones [5].

A medida que se consiguió fabricar elementos de mayor longitud, y conocer sus propiedades resistentes, el nuevo material fue sustituyendo progresivamente a las vigas de madera, pues éstas presentaban el inconveniente de ser combustibles.

La utilización en un edificio de las primeras vigas fabricadas con perfiles metálicos y relleno de yeso data de finales del siglo XVIII, siendo empleadas inicialmente por el arquitecto francés Ango [6] y extendiéndose su uso en Francia, Inglaterra y más tarde en otros países. Durante el siglo XIX se generalizó a nivel

mundial el uso de estos sistemas empleando hormigón y otros materiales de relleno [5].

Principalmente se trataba de perfiles de hierro forjado o fundición, en los que se apoyaban bóvedas cerámicas. Como ya se hiciera antes con la madera, eran recubiertos de yeso con el fin de mejorar la protección de las vigas frente al fuego [7].

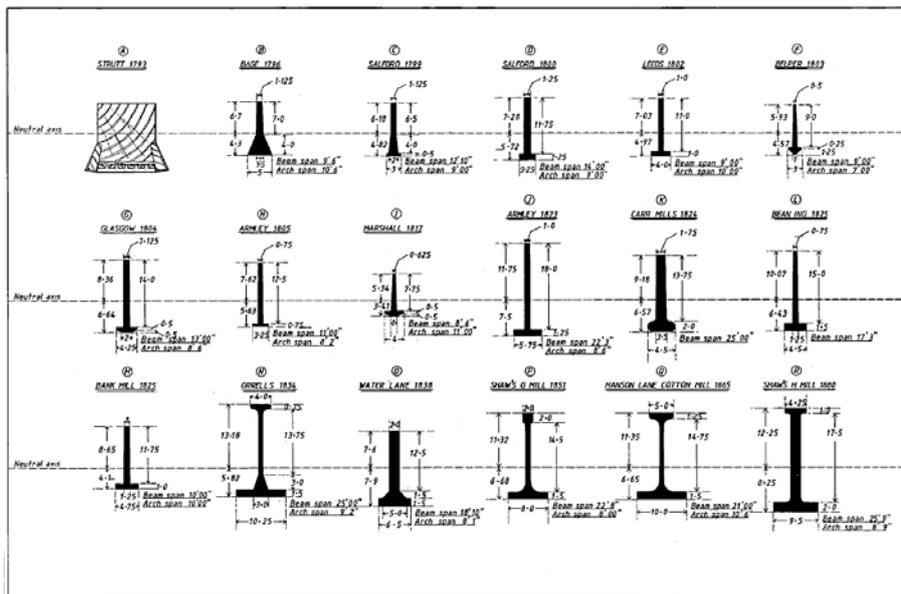


Figura 2-1.- Tipología de secciones de perfiles metálicos empleadas en los siglos XVIII y XIX [8].

Durante más de dos siglos se han venido utilizando perfiles metálicos en forma de doble T para la fabricación de las vigas mixtas, si bien a lo largo de la historia se han utilizado de diversidad de formas. También se han empleado otro tipo de secciones en las que se utilizaban múltiples perfiles como secciones en U y combinaciones de diferentes perfiles con chapas o/y barras. Desde mediados del siglo XIX el aumento del interés por patentar diferentes soluciones constructivas nos deja constancia de la variedad de sistemas que han sido utilizados [9].

Desde el siglo XIX y hasta principios del siglo XX los materiales y las técnicas, tanto de fabricación como de construcción metálica, avanzan rápidamente con la segunda revolución industrial, en la que se acelera más todavía el crecimiento. Con la revolución industrial también aparecen necesidades de espacios que se deben construir con rapidez y de forma que permitan alojar el mayor número de personas

y/o mercancías. Aumentan de tamaño las ferias, los mercados, las estaciones, las galerías comerciales, los edificios de viviendas, y las fábricas. En ellos las soluciones prefabricadas ayudan a construir los proyectos en menor tiempo. Las vigas se fabrican en un nuevo material, el acero, que mejoraba las capacidades de la fundición y el hierro forjado.

Cada vez más disponible y fácil de transportar gracias al ferrocarril, se centralizan los lugares de producción y se pone en marcha la estandarización [10] de geometrías y componentes de las aleaciones.

Aun existiendo esta estandarización, la variedad de estructuras mixtas que se patentan desde entonces hasta hoy es enorme y se pueden encontrar tipos de vigas de acero embebidas en hormigón de muy variadas formas.

Durante las últimas cuatro décadas, se han venido empleando un gran número de sistemas de viga mixta acero-hormigón para construir los forjados, cada vez con luces mayores, tratando de no incrementar en la medida de lo posible el canto de la viga o incluso de reducirlo, gracias a la completa introducción de perfil de acero en la masa de hormigón.

Los materiales más ampliamente utilizados hoy en día en las estructuras son perfiles de acero al carbono y hormigón en masa, aunque hoy en día es posible emplear diferentes hormigones con propiedades mejoradas, así como aceros de altas prestaciones. En figura siguiente se pueden ver dos ejemplos de construcciones recientes que usan esta tipología.



Figura 2-2 Ejemplos de utilización de vigas mixtas: a) Nueva Galería Kons, Luxemburgo M3 Architectes. b) ING building. Meyer & Van Schooten, Arup, Aronsohn.

En la actualidad se emplean a nivel internacional diversas formas de vigas planas; los mayores productores de acero como ArcelorMittal o Tata Steel, fabricantes de soluciones estructurales como Peikko o Klöckner & Co, entre otras comercializan para todo el mundo sus propios sistemas patentados. Estos sistemas constructivos tienen en común que están compuestos de una sección de acero en cuya parte inferior se apoya el elemento de entrevigado, independientemente del tipo que sea, ejecutado in situ, prefabricado o mixto, y que a la vez sirve de apeo durante el proceso de construcción. Dependiendo del tipo de entrevigado, en el momento del hormigonado del forjado y durante su endurecimiento, estos sistemas consiguen que resulte innecesario el uso de encofrados y soportes auxiliares.

La Figura 2-3 muestra diferentes tipos de vigas mixtas que actualmente existen. En particular, la presente tesis doctoral centrará su estudio en las vigas mixtas tipo *slim-floor* (vigas tipo “d” y “e” en la Figura 2-3).

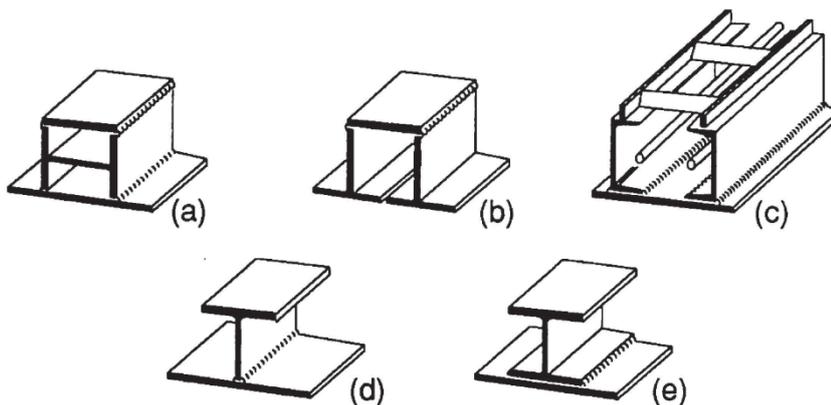


Figura 2-3 Diversos tipos de secciones actuales de vigas metálicas embebidas en el forjado [11]

Estos dos tipos de viga constituyen dos de las configuraciones de perfilaría de acero para vigas planas embebidas en el forjado más utilizadas a nivel mundial, denominadas con los acrónimos IFB (Integrated Floor Beam, tipo “d”) y SFB (Shallow Floor Beam, tipo “e”), respectivamente [12].

Las IFB (Integrated Floor Beam) o vigas integradas en forjado, pueden ser de 2 tipos. En ambos casos, se corta el perfil de acero longitudinalmente a nivel de la mitad de la altura del alma. Posteriormente se suelda una pletina perpendicularmente al extremo cortado del alma. La composición se realiza siempre dejando el ala superior más estrecha que la inferior para facilitar el montaje en obra de los elementos de

entrevigado, las cuales deben apoyar sobre el ala inferior. Es posible fabricar este tipo de vigas con perfiles en I o H.

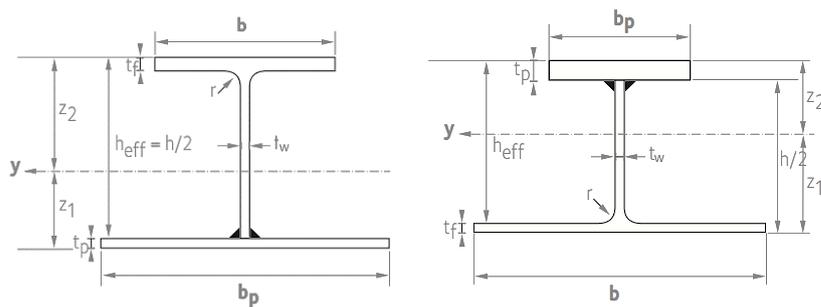


Figura 2-4. Secciones tipo IFB [13].

Por su parte, las SFB (Shallow Floor Beam) o vigas de forjado plano, consisten en el empleo de un perfil laminado en caliente tipo I o H con sus dimensiones originales al que se le suelda a su ala inferior una pletina de acero. Estos perfiles tienen un menor coste de fabricación, pues no es necesario realizar ningún corte y por tanto requieren de la misma cantidad de soldadura con una menor complejidad, pues los dos elementos a unir son paralelos.

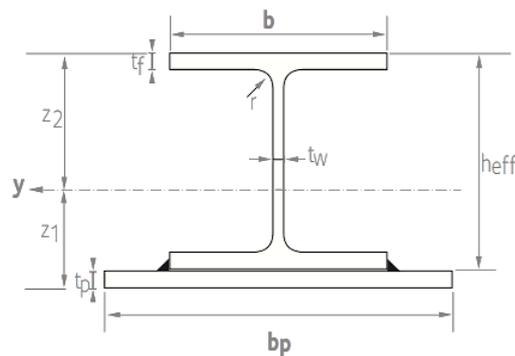


Figura 2-5. Sección tipo SFB [13].

2.2. Ventajas e inconvenientes en el uso de vigas planas mixtas.

Las vigas planas mixtas acero-hormigón han atraído la atención del mundo de la construcción durante las últimas décadas, como evidencia la gran cantidad de edificios construidos con esta tipología [12], debido entre otros aspectos a las siguientes **ventajas**:

1. Interacción entre el perfil de acero y el hormigón (sinergia del conjunto):
 - a) La masa de hormigón aporta una mayor rigidez a las paredes del perfil de acero retrasando e incluso evitando el pandeo lateral. Este efecto se puede intensificar mediante la colocación de armaduras y refuerzos laterales y/o por el uso de hormigones de mayor resistencia.
 - b) Por otro lado, la resistencia a compresión del hormigón situado entre las alas y el alma aumenta debido al confinamiento pasivo que ofrece el perfil. Lo que evita la disgregación del hormigón, en caso de que sea superado su límite resistente, prolongando su utilidad a pesar de la deformación, aumentando su ductilidad, y evitando en última instancia la rotura frágil de la viga.
 - c) Debido a los aspectos reseñados, es posible utilizar secciones mucho más reducidas para soportar las mismas solicitaciones.
 - d) Las vigas mixtas embebidas en el forjado poseen una mayor ductilidad y por tanto mayor capacidad de absorción de energía durante los terremotos, en comparación con las vigas descolgadas.
2. Reducción de costes económicos y de tiempo:
 - a) El perfil metálico sirve de encofrado estanco y en gran número de ocasiones de apeo para la puesta en obra del hormigón, reduciendo con ello el coste de material, equipos y mano de obra y mejorando además los plazos de ejecución. Además, aun cuando el relleno con hormigón no requiere equipos diferentes o especiales, sino los utilizados en los trabajos habituales de hormigonado, es posible emplear técnicas utilizadas en la ejecución de elementos prefabricados, lo que puede simplificar y optimizar la compactación y el curado.
 - b) Es posible construir de forma más rápida y con plazos mejor garantizados gracias a que los trabajos en acero preceden al relleno con hormigón, permitiendo así la ejecución de varias plantas a la vez. Asimismo, la ganancia de resistencia del hormigón o las condiciones climáticas, no condicionan los plazos de ejecución, puesto que el acero aporta la capacidad de carga necesaria

en la fase de montaje. El tiempo necesario para el ensamblado y montaje es reducido y sin esperas, dado que este tipo de perfiles permite aprovechar la facilidad y rapidez de montaje de las estructuras de acero preparadas en taller.

- c) El coste por unidad de resistencia es mucho menor que el de una viga que emplee únicamente acero, puesto que el hormigón es más económico y se utiliza una media de entre 15 y 25 Kg/m². Por lo anteriormente mencionado, el coste también es menor que el de una viga de hormigón armado, ya que, para el mismo coste se obtiene una mayor productividad.
3. Las uniones entre elementos estructurales, aunque sean complejas, resultan sencillas y se pueden estandarizar, ya que se pueden aplicar soluciones constructivas propias de las estructuras de acero, logrando crear espacios abiertos con un número reducido de columnas. Además, los espacios se pueden reorganizar si cambian los requisitos de uso o estéticos.
 4. Mediante el empleo de hormigón y/o acero de alta resistencia, es posible mantener un canto más reducido de la sección. De este modo se aumenta la altura útil por planta, lo que resulta muy ventajoso en lugares donde los edificios tienen limitada su altura máxima [14].
 5. Desde el punto de vista arquitectónico, las vigas *slim-floor* resultan del agrado de los diseñadores porque permiten cubrir grandes luces, hasta 14 m, con cantos reducidos (35 cm), aumentando con ello el volumen útil en cada planta (mayor diafanidad) al reducir el volumen de la estructura, mejorando la visibilidad y el aprovechamiento del espacio disponible.
 6. La parte vista de acero permite un diseño arquitectónico con acabados y aplicación de revestimientos de forma muy sencilla. Las superficies inferiores del entrevigado, como en el caso de las losas prefabricadas, también pueden dejarse vistas.
 7. Los costes decorativos y de protección frente a la corrosión, como por ejemplo proyecciones, pinturas, etc., en caso de ser requeridos, son bajos debido a una menor superficie exterior de acero.
 8. El **comportamiento frente al fuego** de este tipo de vigas mejora al combinar materiales con difusividades térmicas muy diferentes, pues se produce un comportamiento con transitorios de calentamiento acusados e importantes diferencias de temperatura a través de la sección transversal. A causa de estos

gradientes de temperatura, las vigas *slim-floor* pueden diseñarse con la ayuda del empleo de armaduras para alcanzar tiempos elevados de resistencia al fuego sin necesidad de protección externa (R60-R90), siempre que se trabaje con niveles de carga bajos (20%) en situación de incendio.

9. En caso de incendio, en las vigas de hormigón se puede producir el desprendimiento violento del hormigón superficial (fenómeno conocido como “*spalling*”), quedando las armaduras más expuestas al fuego. En el caso de las vigas *slim-floor*, la chapa de acero cubre al hormigón en su cara expuesta, evitando por tanto este fenómeno.
10. El hecho de integrar la viga en el forjado facilita la colocación de instalaciones (conductos de aire acondicionado, tuberías, cableados, etc.) debajo del mismo y simplifica el montaje de falsos techos. Esto permite también la instalación más sencilla de suelos técnicos. Estas alternativas pueden dar opción un mayor canto del perfil y con ello lograr una mayor inercia.
11. Ventajas medioambientales: Por un lado, las del propio material, ya que las estructuras de acero son reutilizables y con posibilidad de reciclado. Por otro lado, al tratarse de una metodología de construcción que emplea elementos prefabricados, reduce el tiempo y los niveles de ruidos y la emisión de partículas en el lugar de la obra.

Entre los principales **inconvenientes** cabe citar:

1. Interacción acero-hormigón. Se debe asegurar el comportamiento conjunto del acero y el hormigón, obligando a una transferencia de tensiones importante en la interfaz entre los dos materiales. Se pueden utilizar para ello conectores que mejoren esta transferencia u otros medios que lo aseguren.
2. Al trabajar con secciones de menor canto, y por tanto con elementos de mayor relación luz/canto, los efectos de segundo orden (las flechas) son mayores, siendo necesario incluirlos en los métodos de dimensionado y comprobación.
3. Normativa de aplicación vigente:
 - a) Existen varios métodos de cálculo para vigas mixtas en diferentes países como Japón, Estados Unidos, Australia, Canadá o Europa, pero a pesar de que se han evaluado diferentes propuestas en los últimos años, éstas no incluyen ningún modelo simplificado que se aproxime al comportamiento térmico en la sección

transversal de los sistemas *slim-floor*. [15]. En vigas mixtas existen tantas y tan diferentes configuraciones, que se hace casi imprescindible un estudio particular de cada caso, de otro modo se corre el riesgo de sobredimensionar la sección o poner en riesgo la seguridad frente a un incendio.

- b) El Eurocódigo 4 cubre solo vigas mixtas de cantos habituales, y no tiene en cuenta la resistencia a flexión de la losa de hormigón [15], lo que da lugar en el diseño a construcciones menos competitivas económicamente.
4. Se desconoce por el momento la respuesta de estas vigas mixtas con la incorporación de nuevos materiales que podrían lograr una mejora potencial de su resistencia frente al fuego, como puede ser la interposición de elementos aislantes intermedios o el empleo de aceros de diferente aleación [16].

2.3. Comportamiento frente al fuego de las vigas planas mixtas.

Tal como se ha comentado con anterioridad, el hecho de rellenar las vigas de acero con hormigón confiere a éstas una elevada resistencia al fuego intrínseca, sin necesidad de protección adicional [17]. Esto es debido, por una parte, a la capacidad del hormigón de disipar el calor al constituir una gran masa con una baja conductividad térmica y por otra, por la menor superficie expuesta de viga de acero. Dicha masa de hormigón también contribuye a la transferencia mecánica, pues además de contribuir a resistir a la carga aplicada, aporta una mayor rigidez a las alas y al alma de los perfiles mejorando su inestabilidad por pandeo local o lateral [18].

Como se ha comentado antes en esta tesis se centra en el estudio de las vigas mixtas SFB y se compara con una viga de tipología similar, las IFB

En general las vigas metálicas embebidas en el forjado a medida que van recibiendo calor en su cara expuesta, lo van transmitiendo a todo el perfil y lo disipan en el hormigón que las envuelve. En el caso de las IFB el calor recibido en su cara expuesta no tiene que atravesar otra chapa ni ninguna interfaz que provoque un salto térmico, sino que es transmitido directamente al alma de la viga y al hormigón más rápido por conducción, por lo que cabe esperar que todo el perfil se caliente más rápido, véase Figura 2-6.

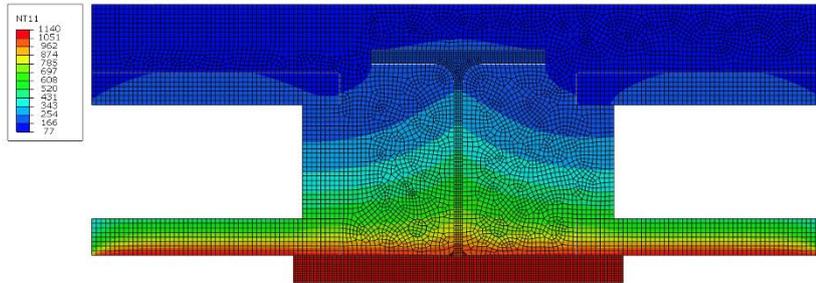


Figura 2-6. Distribución de temperaturas en una viga IFB expuesta a fuego.

El estudio de esta tesis se centra en el caso particular de las vigas tipo SFB, porque existen dos chapas, por un lado la que queda expuesta y por otro paralela a ella queda el ala del perfil laminado. Esto genera la apertura de una interfaz entre las dos chapas a medida que el calor se va transmitiendo a los diferentes componentes lo que origina un salto en el gradiente de temperatura, véase Figura 2-7.

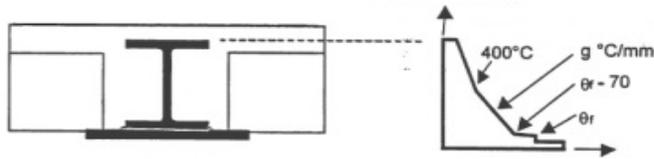


Figura 2-7. Distribución de temperaturas propuesta por el ECCS [19]

El más interesante de estos obstáculos a la transmisión del calor es el siguiente: Durante la exposición al fuego la chapa inferior se dilata antes que el perfil de acero, a cuya ala inferior está soldada por los extremos, de modo que entre estos dos elementos se crea un hueco o “air gap” que dificulta el flujo de calor de entrada al perfil. El calor se transfiere gradualmente desde la chapa inferior al relleno de hormigón y a los extremos del ala inferior, aunque puesto que las propiedades térmicas del hormigón son más favorables que las del acero (presenta una difusividad térmica mucho menor) el calentamiento del hormigón es relativamente más lento.

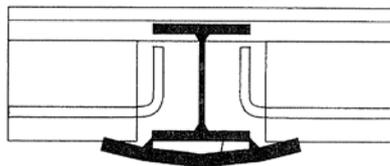


Figura 2-8. Dilatación de la chapa y formación de hueco en caso de incendio, [20]

Otro cambio que se produce durante la exposición a temperaturas elevadas es que, la resistencia mecánica del acero comienza a disminuir a partir de una determinada temperatura (500°C) rápidamente, por lo que la carga es transferida progresivamente a la parte superior de la viga, formada por el perfil de acero y el relleno de hormigón. A medida que la temperatura del perfil de acero aumenta, este trabajo pasa a realizarse por el relleno de hormigón armado, en última instancia la resistencia de éste también disminuye, de modo que la viga no es capaz de resistir la carga aplicada y se produce el fallo a flexión. La disminución de las propiedades mecánicas del hormigón en las vigas *slim-floor* es más lenta que en otro tipo de vigas mixtas, como por ejemplo en las secciones con viga de acero descolgada, ya que el perfil de acero tiene en el caso de las vigas *slim-floor* menos superficie expuesta, y a su vez el hormigón queda protegido de la exposición directa al fuego, minimizando así las consecuencias del efecto *spalling*. [21]

Durante un incendio, la distribución de temperaturas en vigas de acero no embebidas es prácticamente uniforme, a diferencia del comportamiento experimentado en las vigas mixtas tipo *slim-floor*, donde la absorción de calor por parte del hormigón (debido a su reducida conductividad térmica y mayor calor específico) crea fuertes gradientes de temperatura. Esto deriva en un comportamiento con transitorios de calentamiento acusados e importantes diferencias de temperatura a lo largo de la sección transversal [22], lo que retrasa el calentamiento del conjunto. Aprovechando estos gradientes de temperatura, las vigas *slim-floor* se pueden diseñar para lograr una resistencia al fuego elevada sin necesidad de emplear protección pasiva en forma de revestimiento exterior, de modo que incluyendo la armadura necesaria en el hormigón, la propia viga mixta puede ser capaz de soportar por sí misma los esfuerzos que la chapa inferior deja de soportar cuando se calienta.

En función de su particular disposición dentro de la sección transversal, cada elemento sufre una evolución diferente de la reducción de su resistencia a medida que la temperatura que alcanza dicho punto se eleva. Así, la chapa inferior, directamente

expuesta, se calienta rápidamente y experimenta una significativa reducción de su resistencia después de un breve período de tiempo. A su vez, el relleno de hormigón, con una elevada masa y una baja conductividad térmica, mantiene durante más tiempo una proporción significativamente alta de su resistencia inicial. En el caso de las armaduras de refuerzo, a pesar de encontrarse relativamente próximas a la superficie expuesta de la sección, al quedar protegidas por la chapa inferior y por el recubrimiento de hormigón, experimentan una lenta reducción de sus capacidades mecánicas iniciales. La Figura 2-9 muestra el comportamiento descrito de las vigas *slim-floor* en situación de incendio, donde se observa el gradiente de temperatura seccional y la contribución a la resistencia de las diferentes zonas de la sección mixta, pudiéndose analizar a partir de la evolución de la temperatura de cada uno de sus componentes el comportamiento resistente de la viga frente a altas temperaturas.

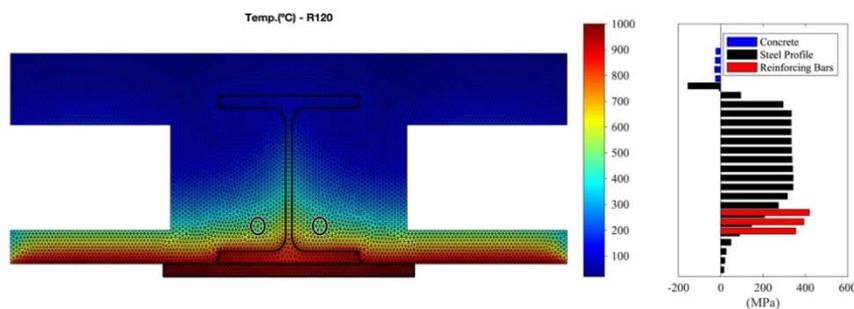


Figura 2-9. Distribución de temperaturas en una viga SFB expuesta a fuego y campo de tensiones seccional [16].

El momento resistente de la sección transversal de una viga mixta, se puede expresar como la suma de las capacidades de cada uno de sus componentes. En el caso de elevadas temperaturas, las capacidades de todos los componentes dependen del tiempo en el instante de cálculo considerado. Cada elemento de la sección se divide en partes en función de su temperatura y el tipo de esfuerzo. La fuerza que es capaz de resistir vendrá dada por la suma de fuerzas obtenidas como producto del área por el coeficiente de reducción del material a la temperatura dada de cada parte, por el límite elástico del material de cada una de las partes (ec. 2.1). Conociendo estas fuerzas y las distancias z_i , ver Figura 2-10, se puede conocer el momento positivo que es capaz de resistir una sección de la viga en un determinado momento como el sumatorio de los productos de la fuerza de cada una de las partes por la distancia (z_i) desde la base hasta su centro de gravedad (ec. 2.2).

$$F_{i,\theta}(t) = A_i k_{i,\theta} f_i \quad (2.1)$$

$$M_{f_i,Rd}(t) = \sum_i z_i F_{i,\theta}(t) \quad (2.2)$$

Donde la posición de la fibra neutra para cada instante puede ser calculada con la ecuación de equilibrio.

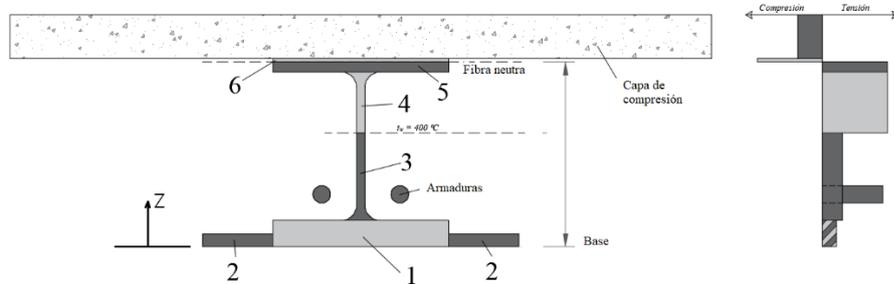


Figura 2-10. Esquema de cálculo de fuerzas en la sección transversal del SFB [16].

En el cálculo a temperatura ambiente lo más frecuente es que el perfil de acero de una viga embebida en el hormigón sea el componente resistente que más aporta, debido a la alta resistencia del acero y a su distribución en la sección transversal. Es a partir de cierta temperatura, de acuerdo con la Figura 2-9, tras un cierto periodo de tiempo, t_1 , cuando se reduce drásticamente el porcentaje de la capacidad resistente inicial en la parte inferior del perfil de acero. Dando paso, en caso de incendio, a que los esfuerzos de tracción que inicialmente soportaba el ala inferior del perfil de acero los asuma la armadura del hormigón de relleno, cuyas propiedades mecánicas se degradarán más tarde y más lentamente debido a la posición que ocupan en el interior de la masa de hormigón.

De todas formas, aunque en el cálculo a temperatura ambiente se pueden lograr altas capacidades resistentes para cantos bastante reducidos de viga mixta sin necesidad de emplear armadura, hay que tener en cuenta que de ser así, la resistencia al fuego de la viga mixta resultará generalmente muy limitada, por debajo de 30 minutos en algunos casos. Por ello, dependiendo de los requerimientos de resistencia

al fuego, y dado que la reducción de la resistencia del conjunto se ve directamente afectada por el calentamiento progresivo del perfil metálico, para lograr una resistencia al fuego superior a 30 minutos, es necesario garantizar una aportación suficiente de armadura si se quiere evitar el empleo de protección pasiva.

Sin embargo, aun en el caso de disponer la armadura necesaria, sólo se consiguen tiempos de resistencia al fuego de entre 60 y 90 minutos y siempre que se trabaje con niveles de carga muy bajos (20%), lo que equivale a una forma de sobredimensionamiento de la sección.

En esta tesis se pretende poder alcanzar valores de resistencia al fuego de entre **90 y 120 minutos**, por lo que se buscará un sistema capaz de resistir este rango de tiempos sin el recubrimiento con materiales de protección pasiva y sin la necesidad de utilizar una excesiva cantidad de acero o armaduras.

Capítulo 3. Estado del arte

Este capítulo resume la revisión bibliográfica sobre el comportamiento frente a altas temperaturas de las vigas mixtas acero-hormigón, mostrando el estado actual de conocimiento y los trabajos y grupos de investigación que se centran en este tema.

Esta tesis doctoral es fundamentalmente experimental, es por ello que, la revisión bibliográfica se ha centrado en las investigaciones basadas en ensayos experimentales de resistencia a altas temperaturas.

3.1. Revisión histórica.

A finales del siglo XIX se tiene constancia de los primeros estudios de comportamiento al fuego de las estructuras [7]. Columnas, forjados eran ensayados en nuevos laboratorios construidos para estudiar el comportamiento al fuego de estos elementos de una forma más homogénea. Al principio la lectura de temperaturas se realizaba por medio de la observación del cambio de fase de sólido a líquido de aleaciones cuyo punto de fusión permitía conocer la temperatura. El combustible utilizado era muchas veces madera o carbón de coque. En aras de una mejor reproductibilidad y fiabilidad de los ensayos pronto se mejoraron esas condiciones. Por un lado se utilizaron termopares, un invento reciente [23], que entonces estaba siendo introducido en la industria para poder medir altas temperaturas y que todavía hoy sigue siendo uno de los instrumentos más fiables para medir temperaturas. Por otro lado, se utilizaron hornos de ensayos en los que como combustible pasaron a emplearse derivados del petróleo y gas natural [24].

Los ensayos dejaron claro que el hierro forjado necesitaba de recubrimientos para su protección frente a altas temperaturas y los sistemas constructivos en los que este se embebía en el hormigón daban buen resultado. Además, el interés en reducir la cantidad de acero empleada llevó en pocos años a elaborar multitud de patentes entre finales de siglo XIX y principios del XX de estructuras de hormigón con elementos de hierro embebidos, y posteriormente reducir a barras estos elementos que no necesitaban más que un recubrimiento del propio hormigón, eliminando pues el coste extra que suponía el uso de elementos de protección, necesarios para garantizar una adecuada resistencia al fuego.

La tecnología empleada en construcción mixta siguió mejorando a medida que se conseguían aceros de mayor calidad y se mejoraban las interacciones entre el perfil de acero y el hormigón.

A partir de mediados de siglo XX, el aumento de la demanda de una construcción rápida, modular y más ligera puso de nuevo a los forjados mixtos como solución más apropiada, lo que fomentó el desarrollo de nuevas tipologías de forjados mixtos. El creciente interés por su introducción en el mercado hizo que se comenzara a estudiar experimentalmente el comportamiento frente al fuego de vigas mixtas de perfil laminado de acero embebidas en hormigón, estudios que se describirán en el siguiente apartado.

3.2. Ensayos experimentales de resistencia al fuego de vigas slim-floor.

Con el reavivado interés por el uso de las estructuras mixtas de finales de siglo XX y la necesidad de estudio del comportamiento frente al fuego para el desarrollo de las normativas a nivel internacional [24], comenzaron a realizarse investigaciones en Inglaterra (British Steel Council BSc), Francia (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, CTICM) y Suiza (Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich). Entre estas, en 1980 empezó una investigación patrocinada por la compañía British Steel plc, actualmente Corus Tubes BV, y que en 2007 fue absorbida por el grupo TATA. En esta investigación, en 1981, la British Steel encargó unos estudios en los que se realizaron una serie de ensayos de resistencia al fuego sobre varias tipologías de forjado mixto. En los primeros ensayos, las placas de entrevigado quedaban simplemente apoyadas, mientras que en los posteriores estas trabajaban de forma solidaria con el perfil por medio del uso de conectores [25, 26]. A continuación, entre 1982 y 1984 se realizaron ensayos donde el perfil quedaba parcialmente embebido en el forjado, utilizándose perfiles angulares atornillados al alma sobre los que apoyaba el forjado prefabricado, quedando el ala inferior y parte del alma expuestas [27-29]. En todos estos se utilizó hormigón H-30 para la fabricación de las placas, pero el espacio entre los prefabricados y la viga se rellenaba con arena. El comportamiento frente al fuego de estas vigas fue mucho mejor, y se demostró que embeber 2/3 de la viga en el forjado, la protegía y ayudaba a disipar el calor de la viga.

Entre 1985 y 1996, se realizó un importante proyecto de investigación sobre *slim-floor* [31]. En el marco de esta investigación se obtuvieron resultados que sirvieron para redactar guías de diseño [13] y desarrollar un software de cálculo para diseño en servicio y a altas temperaturas de vigas mixtas con las tipologías ensayadas "the slim floor design program". Este trabajo fue desarrollado por el Steel Construction Institute. En la campaña de investigación del comportamiento térmico frente a altas temperaturas en [13] en total se ensayaron ocho vigas de sección en doble T de las cuales dos se construyeron con el forjado embebido en el perfil sin placa de apoyo y las otras seis se realizaron con una pletina soldada en su base que servía de apoyo a prelosas de hormigón. En un artículo de este grupo de investigadores [30] se analiza el comportamiento a altas temperaturas de 6 de los ensayos del proyecto, [13] los que más se asemejaban a la tipología *slim-floor*. Se diferencian en tres tipologías. Un primer grupo lo componían cuatro ejemplares rellenos en su parte inferior hasta la mitad de la sección, dos de ellos de hormigón y dos de arena, un segundo tipo en el que todo el perfil quedaba relleno por hormigón y un tercer tipo, al

que se denominó “composite beam”, en el que el hormigón formaba una losa en la parte superior unida al perfil con conectores.

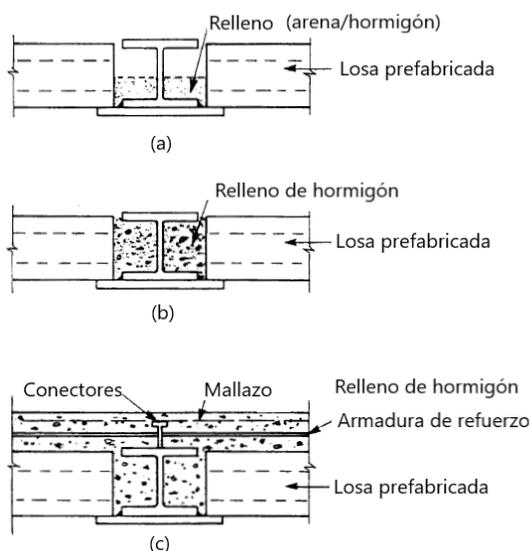


Figura 3-1. Esquemas de slim-floor analizadas en [30].

Los autores de este proyecto fueron también asesores en la redacción de la normativa inglesa BS5950 en aquel momento. Los ensayos fueron llevados a cabo por la sección de investigación de la British Steel, en los laboratorios Swinden, Rotherham (Reino Unido).

Todas las vigas fueron ensayadas térmicamente sin protección externa de ningún tipo. La anchura de las pletinas era siempre 200 mm mayor que el ancho del perfil y su espesor era 15 mm. El cordón de soldadura tenía una garganta de 8 mm.

En posteriores fases del mismo proyecto se llevaron a cabo ensayos con otras tipologías de vigas *slim-floor*, ver Figura 3-2, como vigas perimetrales con perfiles rectangulares [31], algunas de ellas con materiales protectores que crean una barrera aislante para no quedar expuesta al fuego la estructura, lo que alarga su resistencia al fuego o vigas *slim-floor* con perfiles laminados asimétricos [32] en la que no es

preciso la soldadura de una chapa para el apoyo del entrevigado, y por esto mismo la transmisión de calor es más directa a todo el perfil.

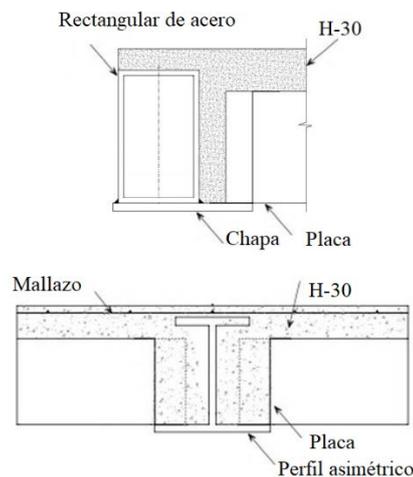


Figura 3-2. Esquemas de slim-floor analizadas en [31] (arriba) y [32] (abajo).

En el compendio que publicó en 2008 la empresa Corus en aquel momento siendo ya parte del grupo TATA [33] se describen los ensayos de comportamiento frente al fuego de vigas *slim-floor* y otros tipos de vigas mixtas acero hormigón. En concreto en él se pueden ver 21 ensayos, en los que se ensayan un total de 30 vigas embebidas en forjado, todos realizados por el Steel construction institute. Entre estos se realizaron 10 ensayos tipo *SBF*: 7 con losas prefabricadas y 3 con entrevigado mixto de chapa perfilada y hormigón, 5 con vigas asimétricas y 3 ensayos en los que se estudiaron vigas de borde para las que se utilizaron perfiles cuadrados. Cada una de las variantes contribuyó a conocer la diversidad en el comportamiento frente al fuego que provocaban los cambios en su diseño o materiales.

En general se puede decir que las vigas tipo *SFB* se comportaron mejor en estos ensayos que aquellas con un solo elemento de acero, aunque no se puede decir con exactitud debido a la gran diversidad de cantos de forjado entre los diferentes experimentos.

Las temperaturas registradas en las vigas con chapa inferior soldada, tipo *SFB* evidenciaban ya el efecto aislante de la junta entre las dos partes. Los flujos de calor

de estas vigas eran más reducidos, comparando estas vigas con las formadas por un solo perfil, lo que les aportaba una mayor resistencia al fuego.

Paralelamente a esta investigación y a raíz del ensayo de un SFB de este compendio, otros investigadores, por medio de un modelo numérico, han realizado análisis sobre la influencia del gap en el comportamiento y resistencia al fuego modelando una separación de entre medio mm y 10mm, llegando a la conclusión de que la mejora del comportamiento no depende del tamaño de la separación [34, 35] aunque se debería comprobar con algún ensayo con diferentes dimensiones.

Por otro lado, también dentro de ese compendio, hubo un ensayo en el que se utilizó hormigón ligero estructural alrededor de la viga. En este, se registró un resultado de resistencia al fuego de más de 60 min dando a entender que este material podría ser interesante para mejorar esta característica. Pero no es posible deducir directamente de estos experimentos si con el hormigón normal se obtendrían resultados distintos pues las secciones fueron diferentes al resto de ensayos.

Paralelamente a los estudios de la British Steel, el grupo ArcelorMittal también estudió el comportamiento frente al fuego de sus sistemas constructivos, creando una serie de patentes y a su vez guías de utilización de los forjados *slim-floor* [12].

En todos estos trabajos, las observaciones ya desde los primeros ensayos evidenciaban las mejores propiedades de los sistemas constructivos en los que el perfil de acero está embebido en el hormigón, en cuanto a su comportamiento frente al fuego, manteniendo mucho más bajas temperaturas en comparación con los sistemas en los que el perfil de acero queda más expuesto.

Como se ha comentado antes una forma de prolongar la resistencia al fuego son los sistemas de protección pasiva. Las pinturas intumescentes, en vigas *slim-floor* frente al fuego han demostrado mejorar enormemente la resistencia al fuego de las construcciones y en concreto se han hecho experimentos con *slim-floor* frente a un incendio [31]. Recientemente, en un estudio realizado con viga mixtas [36], se demostró que para una viga protegida con una capa de 1mm la resistencia al fuego podía aumentar entre 25 y 17 min, dependiendo de si la viga era completa o aligerada. Pero todavía no se conoce un estudio público sobre la durabilidad de estas protecciones y se está a la espera de la aprobación de una normativa que regule el mantenimiento de estas protecciones pues se evidencia que frente al envejecimiento de estas protecciones en muchos casos no se actúa según las recomendaciones de los fabricantes, con revisiones periódicas y mantenimientos adecuados.



Figura 3-3. Deterioro de pinturas intumescentes en perfil HEB.

Los procedimientos para aumentar la resistencia al fuego ya conocidos, obtenidos de la revisión del estado del arte y de la práctica constructiva, contemplan la aplicación de una capa de material aislante en la superficie exterior de los elementos estructurales, que en caso de incendio queden expuestos a las altas temperaturas. De este modo, la interposición de un material aislante entre dicho elemento estructural y el área de un recinto que pueda verse sometida a un incendio, altera significativamente la evolución de las temperaturas en el elemento estructural durante el transcurso de un eventual incendio, de modo que la capacidad mecánica de dicho elemento estructural y por tanto su resistencia al fuego se conservará durante más tiempo.

Algunos materiales aislantes empleados habitualmente en dichas capas son morteros aislantes proyectados tales como los morteros de yeso, de lana mineral, de vermiculita o perlita. También es muy habitual el empleo de pinturas intumescentes en elementos metálicos. Otra alternativa sería la disposición de aplacados de material aislante.

Una desventaja de los procedimientos para aumentar la resistencia al fuego conocidos arriba descritos es que las capas de material aplicadas están expuestas a agentes ambientales externos, lo que puede producir un deterioro de sus propiedades fisicoquímicas a lo largo del tiempo. Por esta razón, tanto las capas de material basadas en morteros aislantes, como las basadas en pinturas intumescentes, deben someterse periódicamente a operaciones de revisión y/o mantenimiento. Los fabricantes e instaladores recomiendan como máximo cada 2 años.

Así, los morteros aislantes pueden perder su adherencia con el paso del tiempo, pudiendo desprenderse del elemento de construcción al que protegen. Para evitar que

esto suceda es necesario aplicar cada cierto tiempo nuevas capas de reparación de dichos materiales. Las pinturas intumescentes también se deterioran con el paso del tiempo, ver Figura 3-3, por lo que es igualmente necesario aplicar, de forma periódica, nuevas capas de mantenimiento.

En cuanto al estado actual de la normativa para el diseño de este tipo de vigas mixtas, en los últimos años se están actualizando los métodos de cálculo en los Eurocódigos, ya que si bien en España el uso de esta tipología es casi anecdótica, en el norte y centro de Europa se tiene una larga tradición de uso.

Las normas actuales no proporcionan una guía específica para tener en cuenta la acción del fuego en el comportamiento mecánico de vigas delgadas embebidas en forjado. Sin embargo, las publicaciones de investigaciones recientes como las de Zaharia et al. [37, 38] o Hanus et al. [39] han puesto a disposición de los calculistas modelos simplificados útiles para predecir la evolución de la temperatura en las diferentes partes de la viga (pletina inferior, ala inferior, alma del perfil, armaduras) bajo exposición a la curva estándar de fuego. Esto ha supuesto un avance significativo, pues si se logra conocer el comportamiento térmico de la sección transversal cuando se expone a temperaturas elevadas, es posible determinar la resistencia al fuego del elemento estructural. Gracias a estas investigaciones también es posible comprobar la importancia de las armaduras en este tipo de sistemas para prolongar la resistencia al fuego, pero que sin embargo no son tan útiles cuando se emplean sistemas de protección pasiva como pinturas o se introducen cambios en la sección que las hacen innecesarias.

Las novedades estructurales siempre requieren un complejo trabajo de puesta en valor si se quiere aprovechar todas sus cualidades en el diseño y proyecto de nuevas edificaciones. Para analizar en profundidad estas ventajas se hicieron más investigaciones de toda clase de tipologías de vigas mixtas; por ejemplo más recientemente en la publicación [40] donde se estudia paramétricamente con diferentes aceros, por medio de un modelo de elementos finitos tridimensional, el comportamiento al fuego, incluyendo como material de la viga diversos tipos de acero inoxidable. En las vigas modeladas con este material, debido a su baja emisividad, se obtenía una reducción del calor absorbido por la viga y con ello mayor resistencia al fuego al retrasar el momento en el que se alcanza la temperatura crítica. Además, la menor conductividad del acero inoxidable modifica el gradiente de temperaturas. Otro ejemplo de viga de forjado ultraplano se dio a conocer gracias al proyecto de investigación experimental [41]. En este, se analizaron las vigas con perforaciones en

el alma. Posteriormente se siguieron analizando el comportamiento de este tipo de vigas, y recientemente se han publicado otros artículos donde se analiza numéricamente su comportamiento al fuego [42, 43], obteniéndose como conclusiones que cuanto mayor es el número y tamaño de las perforaciones el comportamiento al fuego empeora.

Sobre todo, el aspecto que interesa destacar en el comportamiento frente a altas temperaturas de las vigas *slim-floor*, según las configuraciones anteriormente citadas, se basa en la diferencia de temperaturas que aparece entre la chapa inferior y el ala inferior del perfil en H o I que ya fue descrito con anterioridad por Fellingner y Twilt [44]. Esta diferencia de temperaturas, también denominado ‘**gap térmico**’ se produce como consecuencia del espacio que existe en la interfaz entre ambos elementos. Además, se ha descrito en estudios anteriores [17] que dicho ‘gap’ puede verse incluso amplificado con el efecto de las altas temperaturas debido al combado de la chapa inferior por efecto térmico. Como se verá en capítulos posteriores de esta tesis, **un uso eficiente e inteligente de dicho ‘gap térmico’ puede dar lugar a importantes beneficios en la resistencia al fuego de las vigas *slim-floor*.**

3.3. Conclusiones estado del arte.

Como conclusiones del estudio del estado del arte se pueden obtener las siguientes:

- A pesar de las ventajas de los forjados del tipo *slim-floor* arriba mencionadas, en el estado de la técnica no existen todavía vigas diseñadas específicamente para su uso en forjados del tipo *slim-floor* y que tengan, además, **propiedades de resistencia al fuego (R) mejoradas**, hasta el punto de resistir el máximo nivel de exigencia de los edificios.
- Aunque se han realizado análisis computacionales con modelos informáticos, todavía no existe experimentación suficiente como para validarlos con precisión.
- El tamaño de la viga ensayada influye enormemente en el comportamiento térmico, como se ha aprendido de los ensayos realizados por otros investigadores. Es por ello que al estudiar diferentes tipos de sección se deben realizar ensayos con tamaños de vigas lo más similares entre sí y con capacidad resistente estructural similar, para evitar el efecto escala.
- En vista de la revisión bibliográfica hacen falta más test experimentales que comprueben la fiabilidad de los modelos numéricos aplicados a la gran diversidad de combinaciones que se utilizan en la construcción.

- Embeber los perfiles en el forjado supone a parte de evitar la exposición a la radiación de una mayor parte del perfil, una forma de disipar el calor que este recibe en caso de incendio.
- Un relleno total frente a un relleno parcial del espacio entre el perfil y el entrevigado, mejora el comportamiento frente al fuego.
- El relleno con hormigón ligero u hormigón normal mejora este efecto de disipación del calor frente a un relleno de arena.
- Un perfil de la viga con el alma completa, sin aligeramientos o perforaciones, también mejora el comportamiento al fuego de las vigas, por tanto ésta será una de las características a mantener.
- Se puede concluir además que incluir armaduras longitudinales embebidas entre el perfil y el entrevigado, es una buena estrategia. En caso de no disponer de protección pasiva, las armaduras aumentan la resistencia al fuego de las vigas mixtas, pues actúan frente a la rápida pérdida de capacidad resistente del perfil de acero prolongando así la estabilidad de la estructura.
- Se concluye a partir de la comparación de resultados obtenidos en las diferentes investigaciones analizadas, que frente a vigas asimétricas (IFB), las vigas tipo SFB, presentan un mejor comportamiento por el efecto del “gap térmico”. Añadiendo ciertas mejoras de las propiedades térmicas en dicha interfaz y en los materiales de relleno introducidos en ella, se pueden obtener las resistencias al fuego de 90 y 120 min.

En vista de lo anterior, **sería deseable, por tanto, desarrollar vigas diseñadas específicamente para su uso en forjados planos mixtos acero-hormigón que incorporasen elementos destinados a aumentar su resistencia al fuego y que no necesitasen ser sometidos a operaciones de mantenimiento, facilitando y simplificando a su vez su rápida puesta en obra y eliminando o reduciendo las operaciones de aplicación de protección pasiva a los elementos expuestos a la acción de fuego.**

Capítulo 4. Programa experimental

En este capítulo se presenta el programa experimental de la tesis, llevado a cabo en los laboratorios de la Universitat Politècnica de València (UPV). En él se describen las variables fundamentales del programa y los parámetros de cada ensayo para el conjunto de vigas planas mixtas ensayadas.

Se complementa además este capítulo con la descripción del procedimiento de ensayo, detallando las particularidades de éste: el equipamiento disponible, los materiales utilizados, los recursos humanos y los procedimientos empleados para la ejecución de los ensayos.

4.1. Diseño del programa experimental.

Como parte fundamental de esta investigación se desarrolló una primera campaña experimental para estudiar la distribución de temperaturas en las vigas SFB y la influencia de diferentes parámetros sobre ella. Esta campaña fue realizada en cuatro etapas.

a) Etapa 1. Construcción y calibración del horno de ensayos.

Una primera etapa de la campaña consistió en el diseño y construcción de un horno con los materiales y equipamiento disponibles en la UPV. Asimismo, en esta primera etapa hubo que realizar ensayos de caracterización del comportamiento térmico de los materiales existentes.

Esta etapa de ensayos sirvió para calibrar el funcionamiento del horno de ensayos, conocer su comportamiento y medir la capacidad máxima de calentamiento, la velocidad de ésta, así como el flujo de calor desde los paneles emisores hasta la muestra de ensayo.

Una vez realizadas las pruebas que garantizaban la estabilidad y proporcionaban las capacidades necesarias del horno, se ensayaron piezas monocomponente de cada uno de los materiales a emplear en las vigas mixtas, con el fin de conocer sus características de comportamiento térmico y poder cuantificar así el flujo de calor que era transmitido desde los emisores eléctricos hacia la superficie expuesta de los elementos a ensayar.

b) Etapa 2. Estudio previo de la influencia de la emisividad.

En una segunda fase, se ensayaron varias vigas de acero (sin hormigón o losa de forjado) en configuración SFB con 4 diferentes acabados superficiales con los que se alteraba el índice de reflexión superficial por medio de la aplicación de pinturas en la cara expuesta de la viga, o se alteraba el flujo de calor al exterior por medio de aislamiento en la superficie de la viga no expuesta al horno.

El objetivo de este estudio previo fue determinar la influencia de la emisividad de la cara expuesta de la pieza a ensayar sobre el flujo de calor emitido por los paneles radiantes del horno. Se observó que, dadas las dimensiones reducidas de la cámara, la emisividad del material influye en cierta medida sobre la velocidad de subida de temperaturas dentro del horno, pues dicha emisividad determina la capacidad de absorción de la componente de radiación del flujo de calor que recibe la pieza.

c) Etapa 3. Campaña experimental.

Posteriormente a esta etapa, se ensayaron individualmente un grupo de vigas mixtas tipo SFB para obtener su comportamiento térmico. Esta es la etapa principal de la campaña experimental (realizada con mayor detalle) y de la que se obtienen los resultados presentados en el siguiente capítulo.

d) Etapa 4. Ensayo comparativo.

Por último, se realizó un ensayo donde simultáneamente se expusieron a altas temperaturas dos muestras de ensayo en paralelo. Este ensayo fue necesario para comparar bajo las mismas condiciones de exposición térmica la viga patrón y la muestra de interés. Hay que destacar que las vigas fueron reaprovechadas de ensayos anteriores. Los ensayos de estas dos últimas etapas se pueden ver en la Tabla 4-2.

Uso de modelos numéricos (no incluidos en la tesis)

Es necesario aclarar en este punto que, si bien esta tesis es exclusivamente experimental, se ha considerado conveniente hacer referencia a estos modelos, pues siguiendo las fases del proyecto de investigación donde se enmarca la presente tesis doctoral, la etapa 3 de esta experimentación fue diseñada gracias a modelos numéricos realizados simultáneamente por otros miembros del equipo de investigación y que por no ser aportación propia no se incluyen como resultado de la misma.

Esa precampaña numérica se validó con casos de la literatura, pero se adaptó utilizando los resultados de las etapas 1 y 2 de la campaña experimental de esta tesis. Esto permitió tener más información para seleccionar las muestras de ensayo de la campaña experimental.

Tabla 4-1. Valores de diseño de la viga patrón.

Característica	Valor
Longitud	1,50 m
Anchura	0,80 m
Canto	0,27 m
Perfil	HEB 200
Chapa	360 x 15 mm
Límite elástico nominal del acero laminado, f_y	275 MPa
Resistencia característica del hormigón, f_{ck}	30 MPa

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

La viga patrón puede verse en la siguiente Figura 4-1 esquemática.

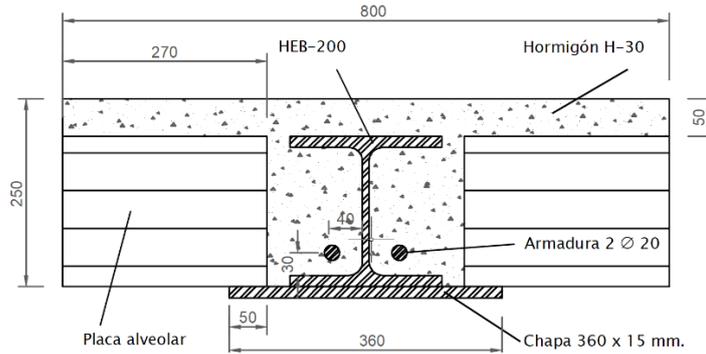


Figura 4-1. Esquema de slim-floor patrón. (cotas en mm)

Para la designación de las muestras de ensayo se adoptó una notación común de tal forma que se pudieran identificar: el grupo al que pertenecen, su denominación con una letra y un número, y en caso de ser requerido, su tipo de relleno, *Tabla 4-2*.

Tabla 4-2. Relación de ensayos realizados en la campaña experimental.

Grupo	Nº	Tipo	Perfil	Chapa	Relleno	Variable a estudiar
	A1	SFB	HEB-200	15mm	H-30	Referencia
1	A2	SFB	HEB-200	20mm	H-30	Chapa
	A3	IFB	1/2 IPE 450	30mm	H-30	IFB
2	A4	SFB	HEB-200	15mm	HL-30	Relleno HL
3	A5	SFB	HEB-200	15mm*	H-30	*Inoxidable
	A6	SFB	HEB-200	15mm	H-30	Pintura
	A7	SFB	HEB-200	15mm	H-30	Aumento de cavidad

A1vA3	A1 + A3
-------	---------

H = hormigón normal; HL = hormigón ligero

La agrupación de casos se ha realizado a fin de poder reconocer de forma más sencilla la influencia de cada una de las variables estudiadas.

La primera columna en la Tabla 4-2 hace referencia al grupo al cual pertenece el experimento. La segunda columna “Nº” indica la designación breve con la que se identifica ese experimento dentro de la campaña experimental. La tercera columna “Tipo” parte hace referencia a la tipología de sección, como se ha explicado en los capítulos anteriores según sea SFB o IFB. La cuarta columna “Perfil” indica en la viga el tipo de perfil laminado de acero. La quinta columna “Chapa” Muestra el espesor de la chapa que se suelda al ala inferior del perfil (siendo el ancho siempre de 360 mm). La sexta columna “Relleno” indica el tipo de hormigón con el que se rellenó la viga, para ello se han utilizado las denominaciones H-30 (hormigón normal) y HL-30 (hormigón ligero) y cuyas características se explican más adelante. Por último, en la columna “Variable a estudiar” se especifica la propiedad en la que se ha diferenciado el ensayo del resto de la campaña, ésta viene destacada por medio de la utilización de la negrita en el texto.

Justificación de las variables estudiadas

Para la selección de las variables a estudiar en la campaña experimental mostrada en la *Tabla 4-2* se tuvieron en cuenta las conclusiones alcanzadas durante el estudio del estado del arte.

Entre otras, se consideraron las siguientes variables: el uso de materiales diferentes en la sección, pequeñas variaciones en la geometría (espesor de la chapa inferior), empleo de recubrimientos y pinturas intumescentes. Se probaron además soluciones innovadoras que permitieran alargar la resistencia al fuego de estos elementos.

La variable más importante que estudiar era la forma de la sección transversal. Las diferentes tipologías existentes de viga *slim-floor* (IFB o SFB) [45] ofrecen diferentes resultados, de tal forma que un cambio pequeño en este sentido aporta grandes diferencias de comportamiento. Inicialmente se ensayaron experimentalmente estas dos tipologías de cara a estudiar las diferencias en su respuesta térmica, pero finalmente la campaña experimental se centró en la tipología SFB por su mejor comportamiento al fuego.

Continuando con el estudio de variables, la segunda opción fue la variación de los materiales de relleno y del tipo de acero empleado. Tomar como variable el tipo de hormigón era algo imperativo, pues en la evolución de los sistemas constructivos [2, 46], las innovaciones con los materiales han aportado grandes diferencias en cuanto a la resistencia frente al fuego. Se eligieron diferentes materiales innovadores cuyo uso se está incrementando en la construcción, de cara a mejorar aspectos como el comportamiento frente al fuego de los sistemas constructivos, así como otros como la durabilidad y la sostenibilidad.

Por un lado, se probó con diversas dosificaciones del hormigón, el uso de diferentes tipos de áridos, así mismo se estudió la posibilidad de realizar rellenos con materiales sustitutivos del hormigón convencional como **los hormigones geopolímeros**, pero su dificultad para lograr el curado en su puesta en obra por su sensibilidad a pequeños cambios de temperatura se descartó su uso en esta campaña experimental. Finalmente, se optó por la utilización de hormigones ligeros.

Por otro lado, se varió también el tipo de acero empleado (acero al carbono y **acero inoxidable**) de cara a aprovechar la potencialidad de aceros normalmente utilizadas para otros ámbitos en la industria, pero con un gran auge en la construcción en los últimos años y que, a pesar de su mayor coste inicial, pueden aportar un mejor comportamiento frente a altas temperaturas.

4.2. Fabricación de las muestras de ensayo.

En la fabricación de las vigas a ensayar se utilizaron los materiales y procesos que se describen a continuación.

4.2.1. Viga de acero estructural

Se empleó el mismo grado de acero en el perfil estructural independientemente del tipo de sección (IPE o HEB). Se utilizaron perfiles laminados en caliente cortados a la longitud de ensayo sin ningún tipo de tratamiento superficial. Para cada tipología de perfil se emplearon barras de la misma colada. Se utilizó el mínimo número de

barras posible a partir del material de origen suministrado por el proveedor con una longitud de 12 m.

Para obtener los perfiles HEB 200 a ensayar se cortaron a partir de solo dos barras todos los elementos que fueron utilizados para los ensayos térmicos, con una longitud de 1,5 m cada uno. Por otra parte, para la fabricación de las pletinas necesarias para los ensayos de caracterización del material se cortó un trozo de 80 cm y, por otro lado, de otras 2 los que sirvieron para los ensayos con vigas de 6 m de resistencia a temperatura ambiente.

Todos los perfiles laminados empleados en la fabricación de las vigas eran de grado S275JR según EN 10025-2, disponiéndose de los resultados de ensayo de calidad de la colada mediante la que fueron fabricados los perfiles.

4.2.2. Pletinas de acero

Se empleó el mismo grado de acero que en el perfil estructural; a excepción de los ejemplares de acero inoxidable (SS) para los cuales se utilizó un acero inoxidable austenítico clasificado como 1.4307 según la norma /AISI 304LC. El material de estas chapas también fue suministrado empleando el mínimo número de piezas originales de forma que la variación de propiedades fuera mínima, obteniendo todas las piezas para las vigas y probetas a partir de una misma plancha para cada tipo de acero.

4.2.3. Hormigón de relleno

Se utilizaron 2 tipos: hormigón normal (H) y hormigón ligero (HL) de resistencia nominal 30 MPa. En ambos se emplearon las mismas materias, para evitar la influencia de variables diferentes a las que se pretendía estudiar, con la salvedad de los áridos especiales empleados para los HL.

Se decidió comparar el hormigón normal para relleno de las vigas mixtas con los hormigones ligeros a base de Arlita, por poseer una menor difusividad térmica, a fin de evaluar la posible mejora en cuanto a comportamiento térmico.

El agua procedía de la red de abastecimiento de agua, de calidad apta para la fabricación de estos hormigones. Se trata de un agua calificada como dura por su alto contenido en carbonatos. Es agua potabilizada sin materia orgánica y con una adición de cloro pequeña. Ninguno de sus componentes altera sensiblemente al hormigón, y es válida para la fabricación de todo tipo de hormigones según lo demuestra la experiencia.

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

En el laboratorio de materiales del ICITECH se acopian cementos de multitud de clases ensacados u a granel, además en los distribuidores de materiales se encuentran en nuestro entorno una gran diversidad de tipos de cemento aceptados en la UNE-EN_197-1. Estos cementos son almacenados de acuerdo con la normativa RC-08. Se descartaron los conservados a granel debido al ambiente, pues se apreciaban ligeros cambios en referencia a las distintas partidas.

Se eligió el tipo CEM I 42,5 R-SR5 ensacado, por ser el cemento que mayor rotación tenía en estos momentos en el laboratorio y por ende mayor disponibilidad y mejores condiciones de calidad en su almacenamiento.

La demanda de agua, así como la mejora de la trabajabilidad en este cemento eran más favorables que el 52,5, pues el tamaño de partículas es mayor, lo que facilitó la preparación del HL-30 que requería una reducida relación agua/cemento.

La arena utilizada en su elaboración de los hormigones procedía de una cantera próxima a las instalaciones de la universidad. En su totalidad se utilizó arena lavada 0/4. En el laboratorio de la UPV se llevaron a cabo ensayos de granulometría de las partidas empleadas. Por los resultados del ensayo que se realizó y que se muestran en la gráfica de la Figura 4-2, puede observarse que cumple los requisitos de granulometría exigida para el árido fino utilizado en la elaboración de hormigones según la EN UNE 933-1:2012. Los resultados sirvieron para optimizar la dosificación del hormigón y obtener una mejor compacidad. Los resultados de estos ensayos se muestran a continuación.

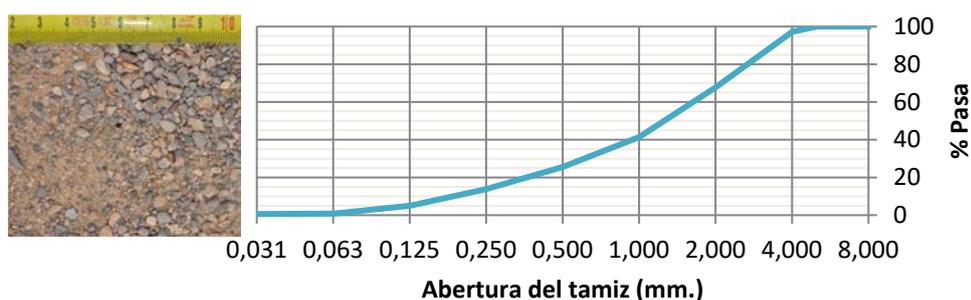


Figura 4-2 Granulometría de la arena empleada en la elaboración del H30 y HL30.

Capítulo 4. Programa experimental.

La arena empleada sigue las condiciones de la UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Además del ensayo de granulometría y de controlarse visualmente como se puede ver en la imagen anterior, se hicieron también ensayos de varios tipos para optimizar la elaboración del hormigón. Entre otros, se realizaron ensayos de absorción cuyo resultado presentó una absorción de un 3,3% y para control de fabricación de hormigón se hicieron ensayos de contenido de humedad para cada amasada, lo que permitía añadir con precisión la cantidad de agua.

La diferencia en los componentes del hormigón está en la utilización de los áridos de mayor tamaño. Para las mezclas de hormigón H30 se emplearon gravas calizas procedentes de canteras próximas a la universidad y para el hormigón ligero se utilizó una mezcla preparada de *Arlita Leca Dur*, árido cerámico de arcilla expandida para hormigones estructurales.

Como en el caso de la arena, los proveedores de las gravas garantizaban que éstas eran aptas para su utilización en la fabricación del hormigón.

La mezcla de gravas utilizadas en el hormigón H30 procedía de dos productos seleccionados en la cantera previamente. La grava utilizada de menor tamaño fue la grava M4-7 y la grava de mayor tamaño M7-12, siendo estos números indicadores de los tamaños mínimos y máximos nominales de sus gránulos y la letra M debido a que es fabricada por machaqueo.

Al igual que en el caso de los anteriores áridos los resultados de estos ensayos se muestran a continuación:

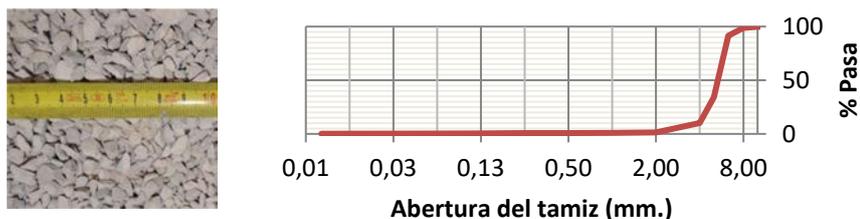


Figura 4-3 Granulometría de la grava 4-7 empleada en la elaboración del H30.

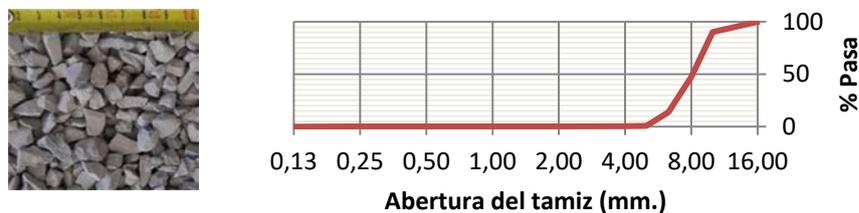


Figura 4-4 Granulometría de la grava M7-12 empleada en la elaboración del H30.

Por otro lado, como se ha dicho antes, para el hormigón HL30 se empleó un árido cerámico, para el cual también se realizaron los mismos ensayos que se muestran a continuación.

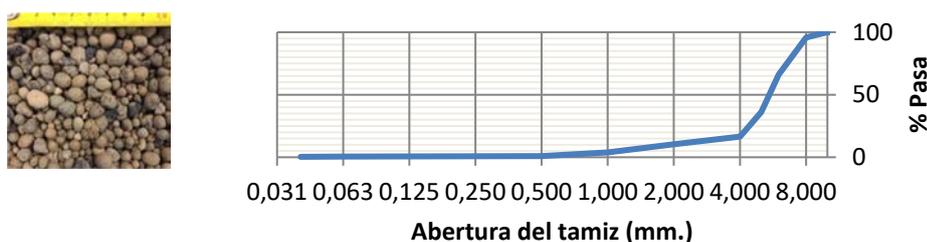


Figura 4-5 Granulometría del árido cerámico empleado en la elaboración de HL30.

La fabricación de los hormigones se llevó a cabo en el laboratorio de ICITECH de la Universitat Politècnica de València. El amasado se realizaba a escasos metros de donde se disponían los encofrados de las vigas.

El valor nominal de la resistencia a compresión de los hormigones de relleno fue de 30 MPa, tanto para el hormigón de áridos calizos como para el de arcilla expandida. El control de las propiedades del hormigón se realizó mediante la elaboración simultánea de un mínimo de 3 probetas cilíndricas de Ø150mm x 300mm, junto con cada una de las vigas del estudio y una cantidad variable de probetas para el estudio de material a diferentes temperaturas que se realizarán en el futuro. Los resultados de los ensayos de rotura a compresión de las probetas cilíndricas se muestran más adelante.

Ambos hormigones fueron dosificados y ensayados previamente para que sus características reológicas y de resistencia mecánica fueran las deseadas.

Las dosificaciones de los materiales utilizadas en la fabricación de los hormigones se pueden ver en la tabla siguiente.

Tabla 4-3. Dosificación de hormigones expresada en kg/m³

Componente	H30	HL30
Cemento	375	400
Agua	225	160
Arena	651	933
Árido M4-7	304	-
Árido M7-12	778	-
Leca Dur 2-10	-	200
Superplastificante	-	7

En una sola amasada se podían fabricar los litros necesarios para el relleno de una viga y de los moldes de las probetas que la acompañaban. El proceso de amasado se hizo siempre en el mismo equipo, para todas las amasadas y hormigones, una amasadora orbital de 44 rev/min de hasta 350 l de capacidad. Seguidamente se describe el proceso de amasado.

En primer lugar, se llevó a cabo el pesado de áridos y la toma de muestras para obtener la humedad de los mismos. A la hora de amasar los hormigones se tuvo en cuenta que el agua se puede encontrar en diferentes cantidades absorbida o combinada con los componentes. Aunque no eran proporciones grandes, dado que la cantidad de agua a emplear en la mezcla del hormigón HL30 era mucho menor, estas cantidades tenían gran repercusión. Por este motivo, para todos los áridos pero sobre todo en la arena, en la que se encontró una cantidad de agua muy variable y de mayor porcentaje, convino medir el contenido de humedad antes de su utilización. Para ello se emplearon hornos de secado de áridos.

Las muestras para obtener la humedad de los áridos y el aditivo se pesaban en una balanza con una precisión de hasta décimas de gramo. El agua, el cemento y los áridos, eran pesados con una precisión de ± 50 g.

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.



Figura 4-6 Preparación de materiales (izq.) preparación de la amasadora (der.)

Una vez preparado el encofrado para su relleno y comprobando la disposición de todos los medios necesarios para el hormigonado, se preparaban los equipos.



Figura 4-7 Vertido de hormigón (izq.) vista amasadora orbital (der.)



Figura 4-8 Viga hormigonada y fratasada, (izq.) relleno de moldes (der.)

Paralelamente a los moldes de las probetas, se les aplicaba superficialmente un desencofrante para superficies no absorbentes para posteriormente facilitar el desmoldeo.

Se realizaban los cálculos de humedad en los áridos y se disponían junto a la amasadora los recipientes con el agua que finalmente era necesaria. Inicialmente se incorporaban a la amasadora los áridos, comenzando por los de mayor tamaño, se añadía la mitad de la arena. Se arrancaba el motor, se vertía el resto de arena y a continuación el cemento. En este momento, se dejaba un minuto amasando la mezcla, unas 40 vueltas y se incorporaba el agua de amasado. A continuación durante 1 min, se añadía el superplastificante en el caso de que lo llevara.

Se realizaba un amasado final de 3 min en caso de hormigón normal y de 5 min para el caso de HL30. A continuación se muestra la tabla de tiempos que se empleaban. El amasado era continuo, es decir no se detenía durante la incorporación de los componentes.

Tabla 4-4. Tiempos en minutos durante el proceso de amasado

Paso	H30	HL30
Áridos	1	1
Cemento	1	1
Agua	1	1
Plastificante		1
Mezclado	3	5

Terminado el amasado, el hormigón era vertido en el balde. Desde éste, se vertía el hormigón en 2 tandas, como es habitual en la construcción in situ de forjados. La compactación del hormigón se realizaba simultáneamente al relleno con un vibrador de aguja estrecho que permitía su introducción entre las placas prefabricadas y el perfil de acero. El encofrado se llenaba en aproximadamente 4 min y después era allanada y fratasada la superficie. Finalmente se cubría con una lona de plástico para conservar la humedad y evitar la evaporación durante el fraguado.

El hormigón restante, se destinaba a rellenar los moldes de las probetas para el estudio de las características del hormigón. Las probetas cilíndricas se rellenaron en tres tongadas, vibrando la mezcla entre cada tongada, mientras que las cúbicas se rellenaban de una vez. Para la compactación del hormigón de las probetas, se utilizó una barra de compactar y una maza. Con ello se lograba extraer la mayor parte del aire ocluido. Inmediatamente después, las probetas se tapaban con una bolsa de plástico de forma que se redujera la evaporación superficial del agua de exudación y eran desmoldadas de acuerdo con la norma entre 18 y 72 horas después de haberlas rellenado. Posteriormente se mantuvieron en cámara húmeda a 20 °C hasta 28 días después de su hormigonado.

El encofrado se conservaba en posición de hormigonado hasta después de desmoldar las probetas y posteriormente se retiraban las tabicas laterales, se dejaba endurecer durante al menos 1 semana sin moverlo del sitio evitando que fueran golpeados.

El ensayo de las probetas se realizaba conforme a la serie de normas UNE EN12390 vigentes en el momento. El refrentado de las probetas para los ensayos de compresión se realizó con una pulidora de disco de diamante, gestionada por el Laboratorio de materiales de construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universitat Politècnica de València, Figura 4-9. Este equipo garantizaba la planicidad de las caras y su perpendicularidad al eje, conforme exige la norma UNE EN 12390-1.



Figura 4-9 Detalle y vista general del equipo de refrentado.

Los ensayos de rotura a compresión se realizaron según la norma UNE-EN 12390-3:2009 y su modificación del 2011. Para obtener el valor f_c de la resistencia a compresión del hormigón, se promedió el conjunto de los valores de las probetas cilíndricas ensayadas con buena rotura, obteniéndose los valores indicados en la Tabla 4-5.

Además, se realizaron ensayos para obtener el módulo de elasticidad del hormigón de cada una de las amasadas, obteniéndose los valores indicados en la Tabla 4-5. Éstos se realizaron según la norma UNE-EN 12390-13:2014.

Tabla 4-5. Resistencias a compresión y módulo de elasticidad para las probetas cilíndricas ensayadas de 15x30cm.

Ensayo Nº	f_c (MPa)	E_c (MPa)
A1	37.89	29500
A2	41.25	31500
A3	39.87	30500
A4	36.15	34000
A5	38.45	30000
A6	40.64	31000
A7	39.43	30500

En el caso de los aditivos plastificantes, siguiendo las recomendaciones del proveedor Sika, fue seleccionado un producto compuesto de poli-carboxilatos modificados, en base acuosa. Con éste se realizaron pastas, morteros y finalmente

hormigón, en pequeñas cantidades, con las que se evaluaron su trabajabilidad y resistencia.

Para los hormigones de áridos ligeros, se empleó una dosis superior a la máxima recomendada, por lo que previamente se realizaron pruebas necesarias hasta obtener las características deseadas del HL30.

En las recomendaciones del fabricante de la arcilla expandida, Arlita, para dosificaciones de hormigones ligeros estructurales, se encuentran dosificaciones con cantidades muy superiores a las garantizadas por el fabricante del superplastificante, del orden de varias veces el máximo. Esto se debe a la necesidad aprovechar más aun la eficiencia del producto y alcanzar mayores reducciones en la relación agua/cemento, en este caso con un valor de 0,4. Con esta relación a/c y la consistencia blanda se consiguió la resistencia nominal de 30 MPa que se deseaba.

Durante el estudio de las dosificaciones, se realizaron diversas pruebas en las amasadas iniciales realizadas con pastas. Se apreció que la trabajabilidad aumentaba con el incremento de superplastificante, hasta que se llegaba un punto a partir del cual el incremento de fluidez compensaba a la resistencia obtenida. Como el objetivo era alcanzar la máxima fluidez sin aumentar el contenido de agua, la cantidad utilizada en ese punto fue la que se empleó para probar en los morteros y en los hormigones. Se observó que esta cantidad máxima de superplastificante variaba al realizar mezclas con arena y posteriormente cuando los áridos de mayor tamaño forman parte del producto final, por esto, resultó imprescindible realizar un estudio experimental de la dosificación del hormigón de áridos ligeros previo al relleno de la viga.

El efecto superplastificante como reductor de agua y fluidificante depende de varios factores. Por un lado los componentes del superplastificante y su compatibilidad con el cemento y el resto de los materiales de la mezcla. Esto se simplificó empleando siempre los mismos productos, un superplastificante de última generación, un mismo cemento y áridos en todas las pruebas. También del volumen amasado de producto y ya que las pruebas iniciales se hicieron con pequeñas cantidades se buscó que inicialmente tuviera mayor resistencia de la necesaria. Influyó también el modelo de amasadora, pues en cada una varía la energía con la que es capaz de mezclar, las rpm. y espacio de amasado. Fue necesario hacer una amasada de prueba final con la amasadora a utilizar en la mezcla del hormigón. La velocidad de añadido del superplastificante y el momento en el que se añade son importantes, en todas las mezclas se dejaba como último componente.

Al existir un espacio reducido de tan sólo 30 mm entre las losas prefabricadas y el ala superior del perfil de acero, de cara a facilitar el proceso de hormigonado in situ de las vigas mixtas se empleó un tamaño máximo de árido de 12 mm, con consistencia fluida para el caso de hormigón H30 y plástica para el hormigón ligero HL30. En este último caso, una menor fluidez, añadido a su viscosidad hizo necesario más tiempo de colocación. Como se produjeron coqueras junto al encofrado, posteriormente al ensayo se comprobó que esto no había sucedido en el interior realizando una demolición progresiva de las vigas, véase Figura 4-10.



Figura 4-10 Detalles de las demoliciones de vigas ensayadas.

4.2.4. Entrevigado

Al pretender estudiar el comportamiento de estas vigas, se debía seleccionar también los elementos de entrevigado, pues esto influía de forma importante en el comportamiento térmico del forjado. Asimismo, la forma en que estos se disponen conlleva una gran variación en la exposición al fuego del elemento y por ello a su comportamiento. En este proyecto se eligió que los elementos de entrevigado quedasen vistos en su parte inferior, exponiéndose así de manera directa a la fuente de calor (sin recubrimiento de yeso).

Como elementos de entrevigado se colocaron losas alveolares prefabricadas de hormigón pretensado de la misma altura que el perfil de acero 20 cm (HCS20) con un ancho de 1,2 m de las cuales se cortaron rebanadas de la longitud necesaria y puesto que, en el diseño elegido la muestra de ensayo tenía un ancho total de 80 cm, la

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

longitud de entrevigado que era necesaria a cada lado fue de 27 cm. La separación de este elemento con respecto de las alas del perfil de acero se mantuvo en 3 cm con el posicionamiento de separadores de mortero, de forma que, aunque el corte de estos elementos tenía una precisión de 1 cm, esta tolerancia hacía variar el ancho total de la muestra de ensayo y no la separación entre la placa y el perfil de acero.

Las losas alveolares pretensadas fueron donadas por la empresa Hermo Prefabricados de Hormigón S.L., véase Figura 4-11.

La resistencia a compresión de estas losas prefabricadas era de 45 MPa.



*Figura 4-11 Imágenes de las losas de alveolares P20*120 suministradas por la empresa Hermo S.L.*

Capítulo 4. Programa experimental.

La longitud total de la muestra de ensayo fue de 1,5 m en todos los casos. Dado que las losas alveolares pretensadas tenían un ancho de 1,2 m como se ha comentado anteriormente, se dejaron en los extremos macizados de hormigón. Se colocó en ellos una armadura de refuerzo de cortante para asegurar la probeta, véase Figura 4-12. Estos extremos sobresalían 15 cm de la zona de exposición por ambos extremos.



Figura 4-12 Prelosas y viga de acero preparada para hormigonar.

4.2.5. Armaduras

Se dispusieron 2 barras de refuerzo de acero B500S de 20 mm de diámetro, a ambos lados del alma dejando una distancia de 40 mm entre el alma y el eje de la armadura y una cota de 30 mm entre la cara superior del ala inferior de la viga de acero y el eje de la armadura, en las posiciones indicadas en la Figura 4-18 y Figura 4-19. Para su correcta posición y evitar movimientos las armaduras se colocaban con separadores de plástico que los distanciaban exactamente a la medida requerida y se ataban con alambre a los extremos de forma que durante el hormigonado y vibrado no se desplazaran de la ubicación, véase Figura 4-13.



Figura 4-13 Detalle de las posiciones de las armaduras en la viga (IFB).

4.2.6. Soldadura

Todas las soldaduras entre piezas de acero fueron realizadas en el laboratorio de ICITECH. Una vez recibidos los materiales, se preparaban las superficies a soldar retirando cualquier suciedad o costra de laminación y se marcaban con precisión los lugares donde realizar las uniones.

El perfil laminado era colocado sobre la chapa cuidando que estuviera centrado y en el caso del IFB ubicando el alma exactamente perpendicular a la chapa.

Para la realización de la soldadura se utilizaron electrodos con recubrimiento de rutilo tipo E6013. Inicialmente los perfiles se punteaban en la posición adecuada y posteriormente eran soldados con tramos discontinuos mediante la longitud que permitía un electrodo, y posteriormente se completaban los huecos de los primeros electrodos hasta hacer continua la pasada. Después del cordón de raíz se realizaban las siguientes pasadas de abajo hacia arriba.



Figura 4-14 Soldadura por tramos alternos de una viga SFB.

Las pasadas sucesivas se hicieron con los tramos a media distancia de los tramos de la pasada anterior para así mejorar la homogeneidad del cordón. La soldadura se realizaba de forma simétrica a ambos lados. La garganta del cordón de soldadura alcanzó como mínimo el valor de la mitad del espesor del alma del perfil laminado en todos los cordones, realizando para ello 3 pasadas sucesivas.

4.3. Descripción de las muestras de ensayo.

En todos los ensayos, se utilizaron un conjunto de características similares que se describen a continuación:

4.3.1. Ensayo A0

Esta viga se preparó únicamente el perfil de acero con tipología SFB disponiendo todos los termopares del interior del perfil y el resto de instrumentación. Se realizaron varias pruebas con esta viga, cambiando la emisividad de la superficie expuesta del ala inferior y el aislamiento exterior alrededor del perfil, para comprobar los cambios en el flujo de calor que estas diferencias causaban sobre su comportamiento térmico.



Figura 4-15 Ensayo con SFB sin hormigón.

4.3.2. Ensayo A1 (Referencia)

Como se ha comentado, la viga mixta A1 se fabricó según la tipología SFB explicada en el capítulo 2 en la que el perfil laminado es un perfil HEB-200 soldado por su ala inferior a una chapa de acero de 15 mm de espesor y 360 mm de anchura, véase Figura 4-16.



Figura 4-16 Viga patrón A1.

4.3.3. Ensayos A2 y A3

El primer grupo de estudio lo formaban los ensayos denominados A2 y A3. Este grupo sirvió para observar **la influencia de la geometría de la sección** sobre el comportamiento térmico.



Figura 4-17 Viga A2.

A diferencia del caso patrón, la viga **A2** se soldó con una chapa 5 mm más gruesa. Ver Figura 4-17 y Figura 4-18

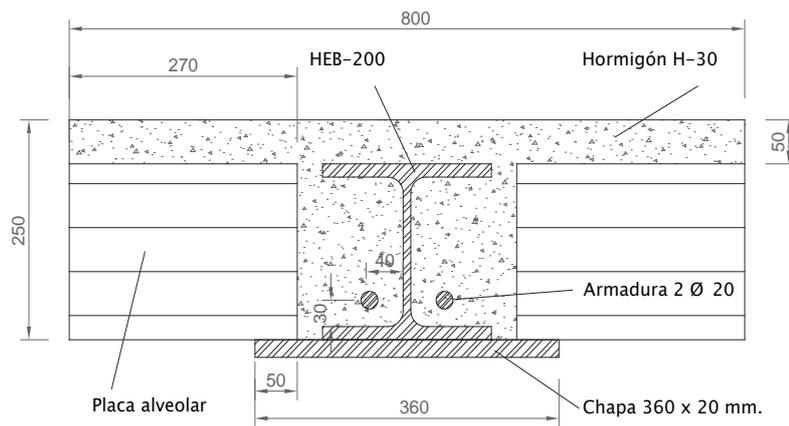


Figura 4-18 Sección de la viga A2. Tipo SFB. (cotas en mm)

La viga **A3**, véase Figura 4-19, se construyó con sección tipo **IFB**, formado por **medio IPE-450** obtenido cortando longitudinalmente el perfil a la altura media del alma. Se posicionó el medio perfil IPE de tal forma que el ala quedaba en la parte superior y se soldó al otro lado de la sección una pletina de acero de 30 mm de espesor y 360 mm de anchura como en los casos anteriores, formando de esta forma una nueva ala inferior de un solo elemento, y no dos como en el caso de la viga A1.

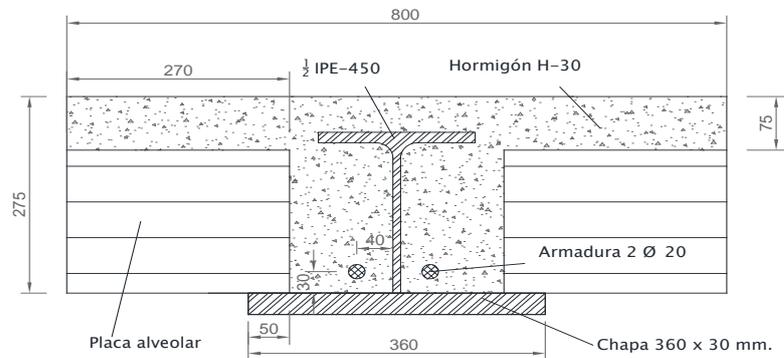


Figura 4-19 Sección de la viga A3. Tipo IFB. (cotas en mm)

A la hora de elegir estas secciones se tuvo en cuenta la gama de perfiles comerciales existentes, con el fin de que, aun cambiando la tipología de viga, el resto de las características fueran similares. De este modo, por un lado, se mantuvo el espesor del ala inferior de la viga en A3 de forma que fuera igual a la suma del ala inferior más la pletina soldada en la viga A1 y, por otro lado, aportar una inercia lo más similar posible a la viga A1, siendo la geometría de la viga A3 de tipo IFB. Esto se aprecia al comparar las dimensiones seccionales en la Figura 4-1 y Figura 4-19.



Figura 4-20 Viga mixta A3. (IFB)

4.3.4. Ensayo A4

En un siguiente ensayo se estudió la diferencia en el comportamiento térmico **debido al empleo de un hormigón de relleno con áridos ligeros**. La viga A4 se

rellenó con hormigón ligero obtenido a base de sustituir los áridos de gran tamaño por granulados de arcilla expandida, véase Figura 4-21. Se adaptó la dosificación del hormigón de forma que la resistencia a compresión fuera similar a la del hormigón normal, con un valor nominal alrededor de 30MPa, ver *Tabla 4-5*. Se pensó en utilizar este hormigón para observar los posibles beneficios sobre el comportamiento térmico de la sección que puede aportar un material con una difusividad térmica menor que en el caso de emplear hormigón con áridos calizos.



Figura 4-21 Viga A4 tipo SFB relleno con HL30.

4.3.5. Ensayos A5, A6 y A7

La tercera variable a estudiar englobó los casos A5, A6 y A7 en los que se estudiaron **diversas formas de incluir materiales que mejorasen la protección frente a altas temperaturas** del perfil de acero, utilizando estrategias para retardar el calentamiento del resto de la sección aplicando el material de protección en la cara expuesta de la viga. **De esta forma se modifica la transmisión del calor desde la chapa soldada al ala inferior.** En la viga **A5**, véase Figura 4-22, la geometría utilizada fue la misma que en la muestra de referencia A1 (Figura 4-1), pero en este caso la pletina soldada al perfil HEB-200 está fabricada con acero inoxidable austenítico 1.4307 (según la norma AISI 304LC).

Investigaciones recientes [47], [48] y [49] han cuantificado la mejor respuesta resistente del acero inoxidable cuando está sometido a temperaturas elevadas, frente a los aceros al carbono convencionales. Es por ello por lo que se empleó en este caso dicho material, a fin de evaluar las ventajas que puede proporcionar sobre el comportamiento térmico de la sección.



Figura 4-22 Viga A5 con chapa de acero inoxidable.

En el ensayo **A6**, véase Figura 4-23, la variación consistió en proteger con un revestimiento intumescente la cara expuesta de la pletina inferior. El material seleccionado fue una pintura intumescente, Promapaint SC4, certificada para proporcionar resistencia al fuego a estructuras. El recubrimiento fue de 1260 micras de espesor medio aplicado mediante rodillo, previo al empleo de un puente de unión.



Figura 4-23 Viga A6 protegida con pintura intumescente.

La viga **A7**, ver Figura 4-25, se construyó con las mismas secciones de acero que el ensayo de referencia, pero forzando un espacio de separación de 5 mm entre el ala inferior del perfil HEB y la pletina que se soldaba al mismo, véase Figura 4-24.

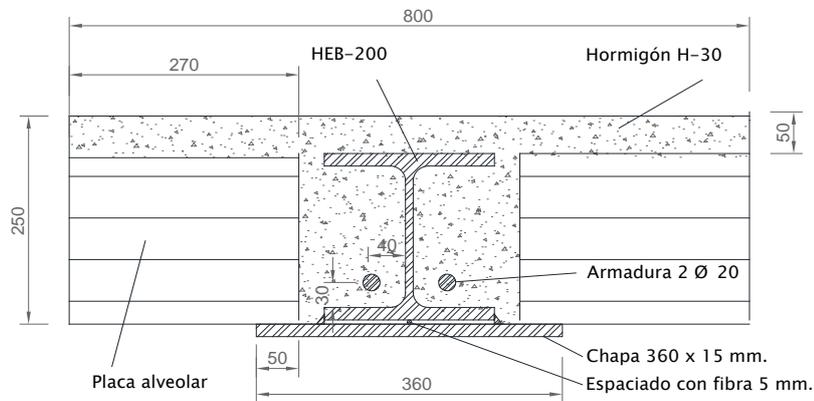


Figura 4-24 Sección de la viga A7. Tipo SFB. (Cotas en mm)

De esta forma, se lograba crear una protección térmica interna en forma de hueco de aire que ejercía cierta resistencia al paso del calor desde la pletina inferior al perfil HEB. Para asegurar este hueco, se dispuso un alambre trefilado de 5mm de diámetro entre el ala inferior del perfil y la chapa, orientado longitudinalmente a lo largo de la viga, de tal forma que mantenía fija la separación entre ambos elementos, lo cual puede observarse en la Figura 4-25.

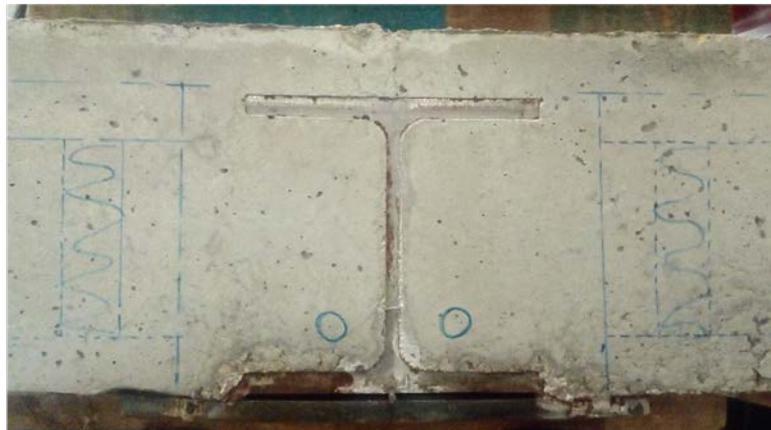


Figura 4-25 Sección de viga delgada integrada en forjado. Ensayo A7.

4.3.6. Ensayo A1vA3

El último grupo de ensayos consistió finalmente en el experimento A1vA3 en el que se comparaban simultáneamente dos vigas, de forma que la curva de

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

temperatura en el horno fuera la misma para ambas. Las vigas seleccionadas fueron la A1 y la A3.

Debido a que el número máximo de termopares a analizar eran 48 y a que algunos termopares habían resultado dañados en el ensayo individual, en este ensayo se seleccionaron los termopares que proporcionaban la información más relevante para registrar los datos y solo de forma puntual se comprobaron temperaturas en el resto.

Se dispusieron ambas muestras de ensayo de forma simétrica sobre el horno, de forma que el calor les afectara por igual, y se colocaron próximas entre sí, separadas únicamente por una capa de 20 mm de lana mineral, véase Figura 4-26 y Figura 4-27.

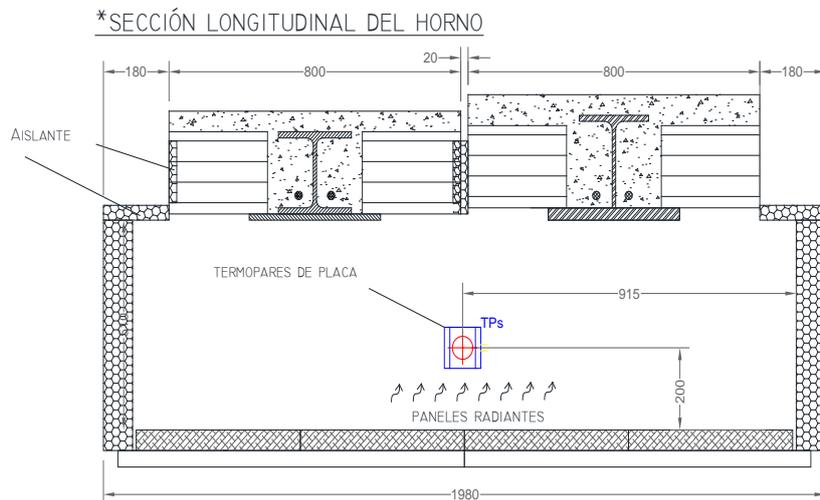


Figura 4-26 Sección del horno durante el ensayo A1vA3.

A través de esta junta se insertaban los termopares del horno. En los extremos se colocaron capas de aislamiento ignífugo, de la misma manera que en los ensayos individuales.



Figura 4-27 Ensayo preparado. Ensayo A1vA3.

4.4. Descripción de equipos de ensayo y sensores.

El programa experimental se realizó íntegramente en las instalaciones de la Universitat Politècnica de València (UPV).

La fase de elaboración de las vigas a ensayar se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) (edificio 4N), mientras que la fase de realización de los ensayos a alta temperatura se realizó en el laboratorio del Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la ETSII (edificio 5G), en ambos en el campus de Vera de la UPV.

4.4.1. Horno de Ensayos.

El equipamiento disponible en la Universitat Politècnica de València requería un cambio en su configuración, ya que se disponía de un horno vertical de paneles radiantes con cuatro caras paralelas dos a dos formando una cámara cerrada, cuyo uso original era para el ensayo de pilares, véase Figura 4-28. Este sistema no permitía exponer elementos horizontales por una sola cara, como en el caso requerido para ensayar las vigas mixtas que se pretendían estudiar.



Figura 4-28 Configuración original del horno de ensayos.

Tras un análisis de los componentes de este horno, se llegó a la conclusión de que se podría desmontar la estructura de paneles y conformar con éstos otra tipología de horno, de tal forma que se dispusiera de una superficie horizontal para la colocación de las vigas a ensayar de casi 2 m². De esta forma, se configuró un nuevo horno formado por cuatro paneles radiantes longitudinales dotado de cuatro resistencias eléctricas cada uno.



Figura 4-29 Nueva disposición de la cámara del horno.

En total el horno consta de 16 emisores radiantes en forma de placa (cada 4 emisores dispuestos longitudinalmente constituyen una placa) regulados por cuatro controladores, cada uno de los cuales realiza el control de temperatura de una banda de emisores dispuestos en la misma zona (bandas transversales). Cada uno de los emisores dispone una potencia de 750W, lo que suma una potencia total para el horno de 12 kW. Los paneles están fijados a una estructura de acero inoxidable que queda aislada de las resistencias eléctricas, estando cubiertas superficialmente por material cerámico y en la cara opuesta por un material aislante de 5 cm de mortero cerámico aislado del exterior por una capa de 10 cm de lana de roca.

De esta forma, los cuatro paneles longitudinales configuran una cámara horizontal en forma de “U” con su cara superior abierta (donde se colocará el elemento a ensayar) y con sus extremos dorsal y frontal cerrados mediante dos paneles aislantes de material cerámico de 10 cm de espesor. La disposición final del horno puede verse en la imagen de la Figura 4-29 y en los planos de la Figura 4-30, Figura 4-31 y Figura 4-32.

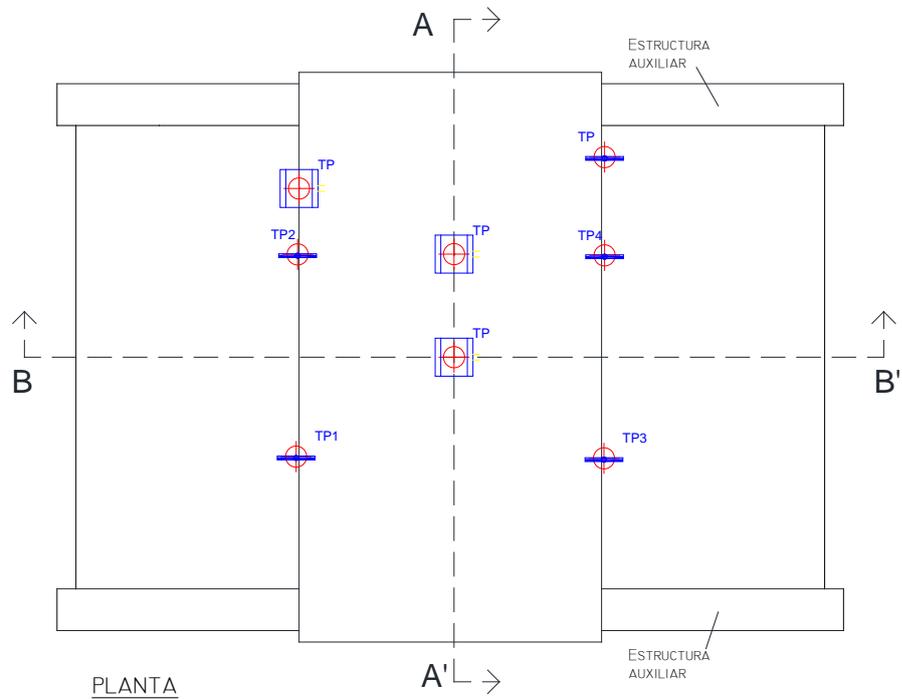


Figura 4-30 Plano de planta del horno construido para los ensayos.

El conjunto así configurado quedaba soportado por una estructura metálica auxiliar formada por dos caballetes y dos vigas que servían tanto de esqueleto de apoyo para los paneles radiantes y cerramiento del horno, como para el soporte de las muestras de ensayo.

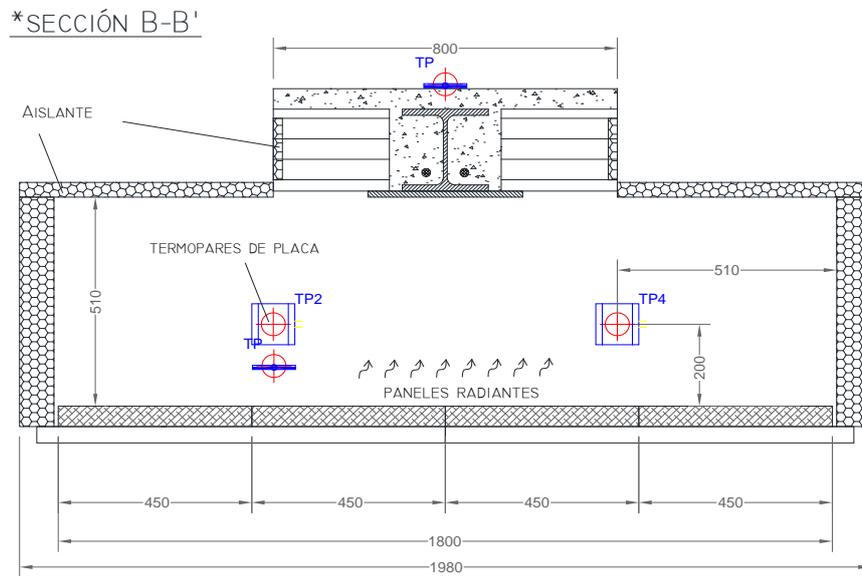


Figura 4-31 Plano de sección longitudinal del horno durante el ensayo de una viga.

Las dimensiones finales de la cámara u hogar del horno resultante tras las operaciones anteriormente descritas son de un metro de ancho, medio metro de profundidad y 1,8 m de longitud. Sobre las vigas auxiliares se disponen a modo de cierre superior las muestras de ensayo. Los elementos de cerramiento y aislamiento necesarios para cubrir completamente la superficie se apoyan en el perímetro del hogar del horno sobre un sellado de lana de roca especial para alta temperatura. De este modo, se consigue evitar corrientes de convección desde el interior del horno al laboratorio, lo cual produciría pérdidas de calor en el horno.

De este modo, se reprodujeron las condiciones de un incendio en una planta de un edificio o sector de incendios en el que la fuente de calor se encuentra en la parte inferior del forjado.

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

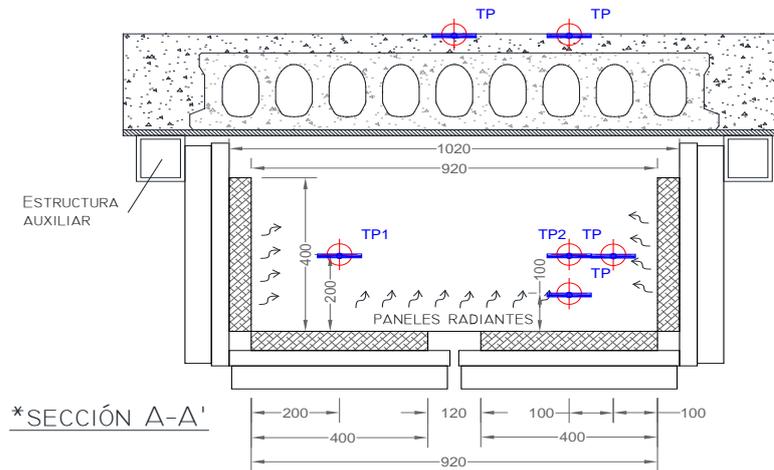


Figura 4-32 Plano de sección transversal del horno construido para los ensayos.

Los paneles del horno están fabricados para trabajar a una temperatura máxima de 815°C. Es posible regular su potencia de trabajo, pero debido a la inercia térmica de los paneles eléctricos, no es posible alcanzar las velocidades de calentamiento requeridas en una curva normalizada ISO 834.

Por tanto, se decidió ensayar siempre prescribiendo la máxima potencia posible en los paneles, estando por tanto la curva de temperatura del horno limitada a la temperatura máxima de los emisores.

Por otra parte, dado que la propia superficie del elemento de forjado a ensayar constituye una parte importante del cerramiento del horno en comparación con las dimensiones de la cámara (véase Figura 4-33), las características y materiales utilizados en cada muestra condicionan la respuesta del propio horno, de tal forma que la curva de temperatura de éste varía de un ensayo a otro. Esto es debido fundamentalmente a los diferentes valores de aislamiento e inercia térmica que aporta cada muestra de ensayo. Es por esto por lo que los ensayos realizados no siguen los parámetros estándar de los ensayos normalizados. En la fase de análisis de resultados se presentará una gráfica comparativa de las diferentes curvas de calentamiento.



Figura 4-33 Fotografía exterior de uno de los ensayos.

4.4.2. Medida de temperatura de las muestras de ensayo.

Para el control de la temperatura de las muestras de ensayo se utilizaron termopares tipo K. Los termopares de este tipo tienen el conductor positivo de una aleación de níquel y cromo, y el negativo de una aleación que contiene níquel y aluminio. Este tipo de termopares pueden medir temperaturas de 0° C hasta 1100 ° C con gran precisión (entre 375 y 1000° C el error es $0.004^{\circ}\text{C} * \theta$).

Se instalaron termopares distribuidos por grupos en dos secciones transversales de cada viga, de forma que se colocaban un total de 17 termopares en la sección central y el mismo número en una sección a $\frac{1}{4}$ de la longitud expuesta de la viga, es decir separada 250 mm de la sección central.

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

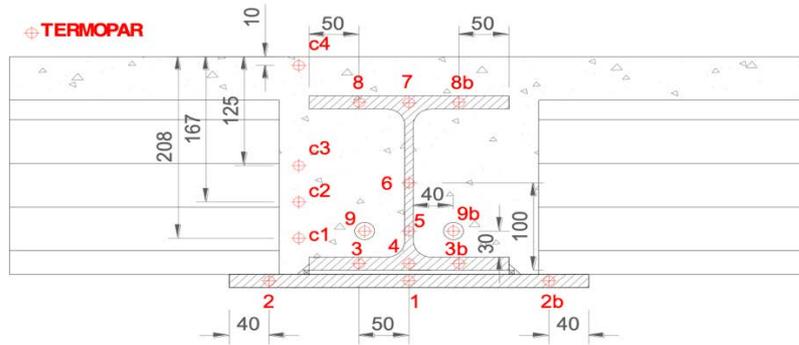


Figura 4-34 Plano de ubicación de termopares en la sección central. Sección SFB.

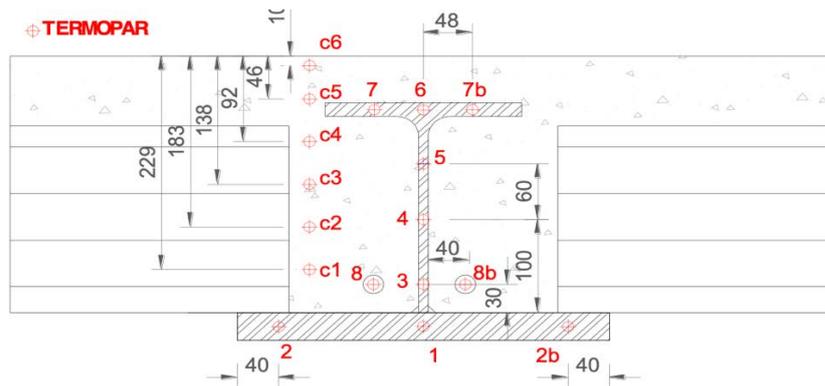


Figura 4-35 Plano de ubicación de termopares en la sección central. Sección IFB.

Conforme se puede ver en la Figura 4-34, tanto para la tipología SFB como la IFB los termopares 1, 2 y 2b miden la temperatura de la chapa inferior de acero. Por otro lado, para el SFB en el del perfil de acero se colocaron 8 termopares y para el caso del IFB se colocaron 6, ver Figura 4-35, distribuidos de forma que se obtuviera un control detallado de diversas zonas del perfil. Del mismo modo, se colocaron termopares en las armaduras y así mismo, en las mismas secciones fueron colocados 5 termopares a diferentes profundidades previamente al relleno de hormigón de forma que quedaron embebidos en él.

Para el equipo de control del horno se dispusieron cuatro termopares con los que se controlaba el funcionamiento de los emisores, los extremos de medida para el control estaban colocados en la superficie radiante de los paneles, disponiendo uno en un emisor de cada serie, véase Figura 4-36.



Figura 4-36. Colocación de termopares de control de emisores en el horno.

Estos termopares eran diferentes y se eligieron para que resistieran un uso prolongado a lo largo de todos los ensayos sin perder prestaciones.

Se seleccionó otra tipología de termopares en los que el par de cables está recubierto por una vaina elaborada de Inconel, una aleación de elevada resistencia a las altas temperaturas. Se eligió un diámetro pequeño, 1.5mm, para que la lectura de la temperatura fuera instantánea, pero tuviera cierta rigidez, y de 1 m de longitud para que mantuvieran su posición tanto a la hora de instalarlos como durante todo el ensayo. Con estas dimensiones, era posible adaptarlos y atravesar el aislamiento que tapaba el horno, quedando así situados en la superficie de los emisores durante todo el ensayo.

El interior de la vaina metálica del termopar se encuentra relleno con un material mineral aislante que recubría a los cables. Se eligieron aislados para intentar evitar retornos de masa ya que trabajaban cerca de las resistencias eléctricas.

Tenían dos termopares, de modo que, por un lado, un par servía para el control de regulación del horno y el otro par informaba en todo momento al PC que registraba los datos.

Además, se dispusieron varios termopares de placa conforme a la normativa, en un número mínimo de 4 y hasta 8 para medir la temperatura de la cámara del horno en las proximidades de las vigas de ensayo como se puede ver en el ejemplo de la Figura 4-32. Por medio de estos termopares se podía obtener el grado de homogeneidad de temperaturas dentro de la cámara del horno.



Figura 4-37 Disposición de termopares de placa para horno.

4.4.3. Adquisición de datos

Los dispositivos de adquisición de datos estaban organizados de forma que cada uno recogía la temperatura ambiente y ocho de los termopares dispuestos para el ensayo. El registro de la temperatura durante todo el ensayo en todos estos puntos con un período de 20" permitía conocer el comportamiento térmico seccional de las vigas que se ensayaron.

En la mayoría de los ensayos, a pesar de las limitaciones comentadas, se alcanzaron temperaturas en la cámara del horno superiores a los 750°C y superiores a 700 °C en la pletina expuesta de las vigas. Por lo tanto, puede considerarse que la distribución de temperaturas de la sección transversal durante los ensayos es proporcional y similar en orden de magnitud a la que se daría en caso de un incendio real.

En los elementos a ensayar se procuró dar el mismo tratamiento en todos ellos a cada una de las superficies exteriores. En todos ellos solo se aisló la parte inferior hasta una altura de 12 cm aproximadamente y se cegaron con papel ignífugo de material cerámico aislante, los alveolos de las placas prefabricadas para impedir la pérdida de calor a través de estos, pues en situación de incendio estos alveolos están cerrados al exterior, véase Figura 4-38.



Figura 4-38. Vista exterior del ensayo.

Las caras superior y laterales de los elementos ensayados quedaban al descubierto, produciéndose con ello una pérdida de calor al ambiente de la sala (calor cedido por la muestra por convección y radiación). En la sala de ensayo se activaba un equipo de ventilación y climatización para mantener la sala a la temperatura inicial del ensayo y evitar intoxicaciones por la emanación de gases que pudieran generar algunos de los productos utilizados en la preparación del ensayo, como por ejemplo la pintura intumescente.

Debido al carácter no estándar de los ensayos, la información que éstos aportan sirvió para hacer un estudio comparativo del comportamiento térmico de las diferentes variaciones realizadas en las vigas. Para dar una mayor claridad de comparación y semejanza en las condiciones de ensayo se desarrollaron también ensayos en los que 2 vigas eran ensayadas juntas como en el caso del ensayo A1vA3.

4.5. Condiciones de los ensayos.

En este punto se describen las fases y condiciones en las que se desarrollaron los ensayos térmicos. Se incluyen los procesos de disposición de la instrumentación, así como las características de los ensayos para determinar el comportamiento de las vigas mixtas frente a altas temperaturas.

4.5.1. Instalación de las muestras de ensayo.

Las vigas, que habían fraguado durante 28 días en el laboratorio de materiales del ICITECH, eran transportadas al laboratorio del Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la UPV donde se instaló el horno para ser ensayadas.

La viga o vigas a ensayar se colocaba en la parte superior del horno, en su zona central y en posición horizontal, sirviendo a su vez de cerramiento superior de la cámara del horno, véase Figura 4-33. De esta forma se garantizaba que la exposición a la fuente de calor mediante los paneles radiantes era simétrica y recibía la mayor cantidad posible de calor, quedando expuesta la muestra por su cara inferior, ver Figura 4-31.

Antes de colocar los ejemplares a ensayar se cubrían con manta cerámica todas las superficies del horno que iban a quedar en contacto con la muestra, a fin de asegurar un aislamiento de la estructura de apoyo y un sellado adecuado, evitando así fugas de calor desde el horno al exterior, véase Figura 4-29 y Figura 4-31. De la misma forma, se cubrían con manta cerámica los puntos de contacto en los apoyos. En un extremo, la probeta apoyaba en un cilindro fijo que permitía la rotación pero no la traslación; y en el otro, se dispuso un cilindro libre, de modo que permitía tanto giros como desplazamientos. De esta forma, las dilataciones de la pieza por efecto del calor sólo producían deformaciones en la misma y no tensiones hiperestáticas. Bajo estas condiciones de ensayo, las muestras trabajaban exclusivamente a peso propio, sin recibir sollicitaciones adicionales.



Figura 4-39. Colocación de la muestra de ensayo en el horno.

Una vez colocada la muestra a ensayar, se disponían los elementos de cierre del resto de la superficie de la parte superior del horno. Éstos se ubicaban a una altura igual a la del perfil metálico, de modo que el elemento a ensayar formaba un plano horizontal junto con los cierres superiores, ver Figura 4-31. Estos cierres consistían en un panel multicapa formado por dos placas ignífugas de silicatos de resistencia a altas temperaturas (superiores a 1150°C) en el exterior y el interior, y una manta de lana mineral entre las dos placas. Los dos materiales de cierre presentaban una conductividad muy baja. A la temperatura máxima de ensayo, 800° C, el valor garantizado por el fabricante era de 0.15 W/m K. El espesor total de 8 cm de estos cierres proporcionaba un aislamiento térmico similar al del conjunto de la envolvente del horno.

También se protegieron los alveolos de las losas prefabricadas mediante un tapón de lana mineral de 5 cm de espesor formado por una espiral de papel mineral, de forma que se adaptase a la superficie del alveolo, limitando así las pérdidas de calor por convección de aire exterior al interior de éstos. La superficie de contacto entre el elemento y los cierres también se rellenaba con una banda de 5 mm de lana mineral ignífuga, de forma que eliminase el espacio entre el contorno del elemento y los cierres, sellando el paso de aire caliente, ver Figura 4-38.

Bajo la muestra a ensayar se colocaba una malla de acero galvanizado de forma que protegiera las placas cerámicas del horno frente a una posible explosión accidental de fragmentos de hormigón (“*spalling*”), véase Figura 4-39. El resto de las superficies

de la muestra a ensayar se dejaban al descubierto, de forma que ningún otro material influía en su comportamiento térmico.



Figura 4-40. Preparación ensayo A1.

Dada la gran masa de la muestra de ensayo, se tuvieron que añadir elementos de anclaje para su movimiento y colocación, de manera que se pudieran manipular con una carretilla elevadora y/o una grúa.

4.5.2. Instrumentación.

En los ensayos de la campaña experimental se emplearon únicamente sensores de temperatura y un reloj comparador de desplazamientos con una precisión de micras.

El reloj comparador era utilizado para controlar la flecha de la viga, posicionándose en el centro del elemento a ensayar y fijándose su base de referencia para la medida en la estructura auxiliar de soporte, a fin de evitar movimientos debidos a la temperatura. Para que la variación de temperatura no alterase la medida, la lectura se hacía sobre el extremo de una barra de alúmina colocada sobre la muestra de ensayo, perpendicularmente al mismo; el reloj comparador quedaba separado a una distancia de 10 cm y protegido casi por completo de la fuente de calor, permaneciendo a la temperatura del laboratorio. Esta instrumentación se mantenía hasta el final del ensayo, realizando lecturas cada 20 minutos para observar la evolución de la flecha.

Esta observación de la flecha se hacía para comprobar que el comportamiento por dilatación de la viga era el esperado y por motivos de seguridad, a modo de sensor del correcto desarrollo del ensayo.



Figura 4-41. Preparación del ensayo. Colocación del reloj comparador de posición.

Para conocer el comportamiento térmico de la muestra se empleaban los termopares descritos en el apartado 4.4.2. La temperatura se monitorizaba en dos planos transversales del elemento: uno en la sección central y otro a $\frac{1}{4}$ de la longitud de exposición de la muestra.

Los termopares situados en el interior de la muestra de ensayo se colocaban previos a la fase de hormigonado. Los termopares para medida de temperatura en los elementos de acero eran ubicados de manera que se asegurara el contacto directo con el material, entrando dentro del espesor del elemento. Para ello se realizaban perforaciones de 2 mm de diámetro y con la profundidad necesaria para la introducción del par de hilos en paralelo de los termopares tipo K a los que se trenzaba su extremo. Éstos eran fijados al elemento de acero por medio de alambres soldados al perfil para impedir que se desplazaran durante el hormigonado.

En cuanto a los termopares para detectar temperaturas en la masa de hormigón, la punta del termopar se preparaba de la misma forma que los anteriores, y se posicionaban fijándolos al mallazo colocado en la capa de compresión y a los elementos del encofrado. Los cables eran agrupados, por un lado, para aumentar la firmeza de su sujeción y la exactitud de la posición y por otro lado, para facilitar el hormigonado.

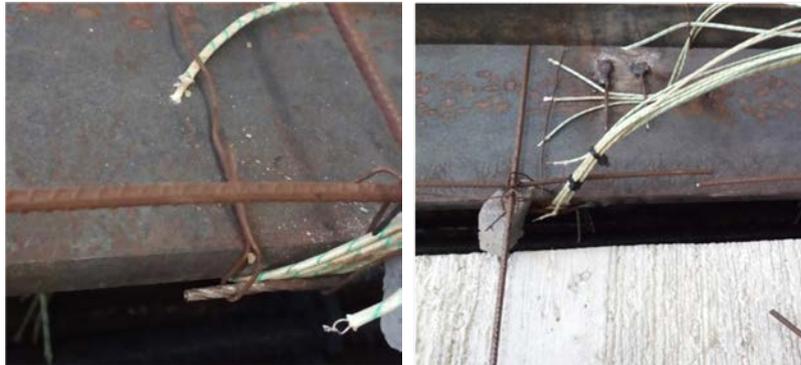


Figura 4-42. Ubicación de termopares interiores.

Los termopares para medir temperatura en zonas exteriores se colocaron durante la instalación de las muestras sobre el horno. Antes de cerrar el horno se disponían los termopares de placa que detectaban la temperatura ambiente del horno.



Figura 4-43. Ubicación de los termopares de placa.

Se colocaban dos termopares a cada lado del elemento, como se aprecia en la Figura 4-43. Además de estos cuatro termopares, también se contaba con dos medidas adicionales de la temperatura del horno con termopares de placa situados paralelamente a una distancia de 10 cm de las placas radiantes del horno, uno junto a una placa del fondo y otra junto a una placa lateral, véase Figura 4-30 y Figura 4-32

Finalmente, se colocaban otros dos termopares de placa en el exterior sobre la parte superior de la muestra de ensayo, justo en el plano de medida de cada una de las secciones de termopares del interior de la muestra.

4.5.3. Desarrollo del ensayo a altas temperaturas.

Una vez ubicada en su correcta posición y debidamente instrumentada, se realizaba una fase de secado de la muestra a ensayar, manteniéndose en el horno a 105° durante 24 horas. De esta forma se minimizaba el riesgo de desprendimientos superficiales de hormigón por la presión que el vapor de agua ejerce en su interior.

A lo largo de la jornada siguiente, se dejaba enfriar el conjunto a temperatura ambiente. Durante esta fase de secado, se conectaban todos los termopares al equipo de adquisición de datos y al ordenador de almacenamiento de datos.

Al día siguiente, estando ya la muestra a temperatura ambiente, se iniciaba el ensayo a alta temperatura. El primer paso consistía en encender los equipos de adquisición de datos, comprobar de nuevo que los valores eran los correctos y comenzar la grabación de las lecturas de temperaturas. Una vez hecha esta comprobación, se prescribía en el horno la temperatura máxima de consigna: 815°C. trabajando los paneles radiantes a su máximo rendimiento en todo momento. Ver Figura 4-45.



Figura 4-44. Sistema de control de horno y adquisición de datos de temperaturas.

En situación de incendio, conforme se incrementa la temperatura, el contenido de humedad del hormigón es transformado en vapor de agua a partir de su temperatura de evaporación (100°C). Este vapor de agua provoca una presión interna elevada y busca salir por la red de poros de la masa de hormigón, de tal forma que no logra superar la resistencia del hormigón para “escapar” a la superficie, pues el hormigón se encuentra confinado entre las alas del perfil. Los caminos que encuentra este vapor de agua son inicialmente a través de la interfaz entre el acero y el hormigón, y cuando aparecen, también por las fisuras que se van formando. Esto se ha evidenciado en los ensayos experimentales realizados, véase Figura 4-45.



Figura 4-45. Exudación de vapor y goteo de agua durante el ensayo.

Después de que el horno alcanzase la temperatura máxima estable, ésta se mantenía aún por largo tiempo hasta llegar a régimen estacionario en el que el flujo de calor que aportaban las placas térmicas no elevaba la temperatura de la superficie expuesta de la chapa de la viga, aunque el resto de la muestra de ensayo continuaba elevando su temperatura por el aporte continuo de calor de las placas radiantes. Los ensayos se finalizaban tras 240 minutos de exposición, pues se asume que en edificación no se exigen duraciones más prolongadas de resistencia en situación de incendio.

Tras concluir el ensayo, se registró también la fase de enfriamiento, sin modificar la disposición de los elementos e instrumentación.

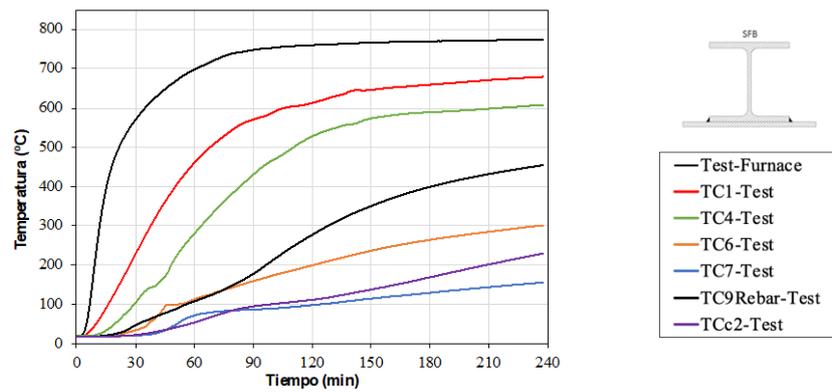
Capítulo 5. Análisis de los resultados experimentales

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en los ensayos experimentales llevados a cabo, examinando la influencia de las diferentes variables de diseño consideradas sobre la respuesta térmica de las vigas mixtas.

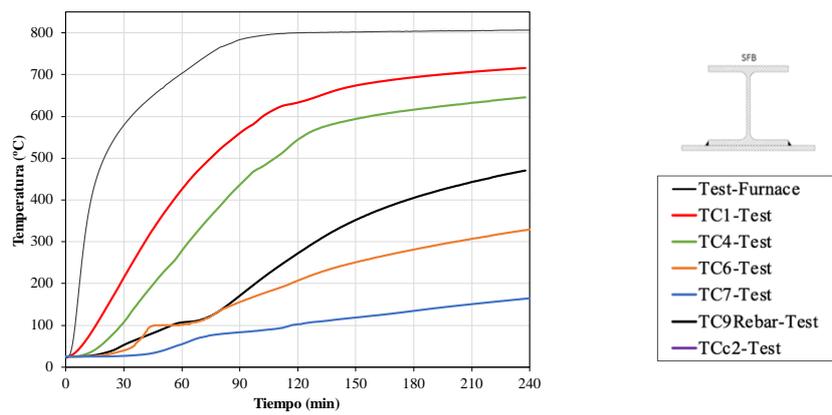
5.1. Análisis de termopares.

A continuación, se muestra en la Figura 5-1 el resultado de las temperaturas registradas por los diversos termopares en cada uno de los ensayos realizados. Por simplicidad y claridad, en las gráficas presentadas únicamente se muestran los termopares TC1-TC4-TC6-TC7 dispuestos en los elementos de acero de la viga mixta a lo largo de su eje de simetría, el termopar TC9 para la temperatura de las armaduras y TCc2 como referencia de temperatura en el hormigón vertido 'in situ'. Véanse la Figura 4-34 y Figura 4-35 para el detalle de la disposición de termopares.

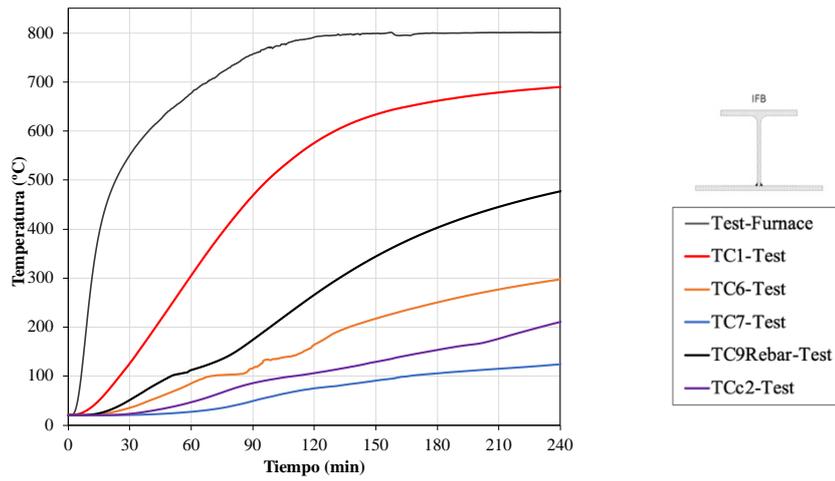
a) Ensayo SFB - A1



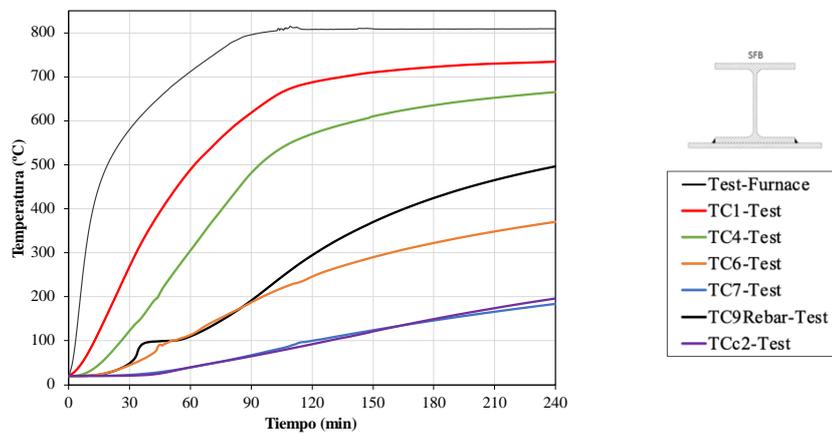
b) Ensayo SFB - A2



c) Ensayo IFB - A3

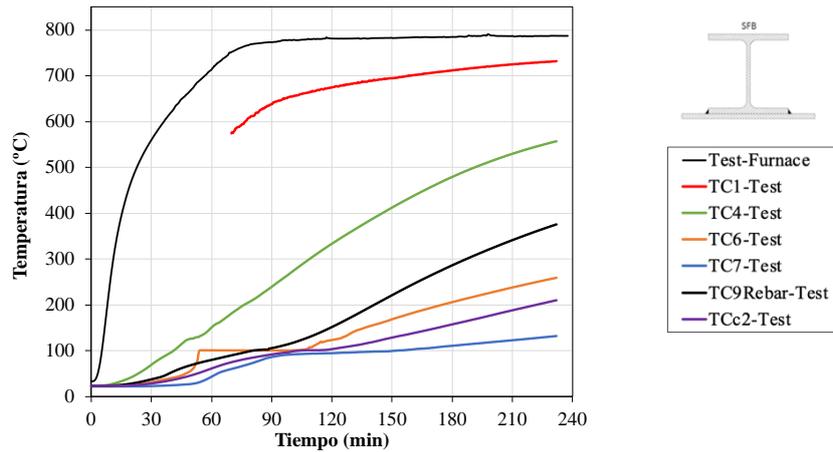


d) Ensayo SFB - A4

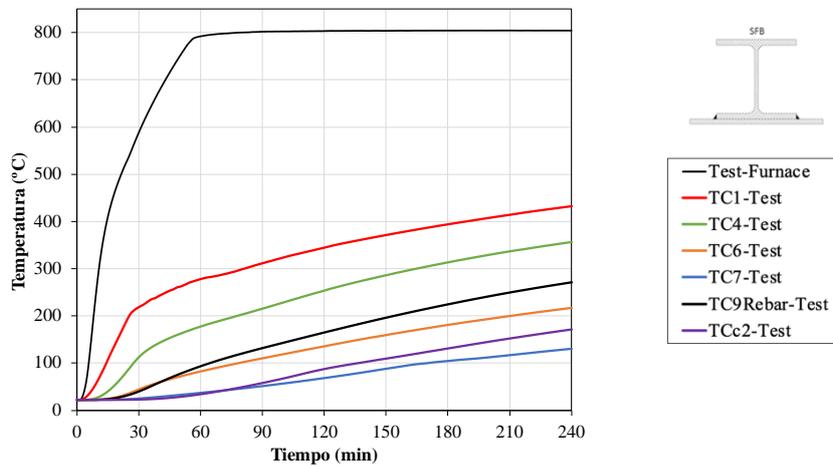


Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

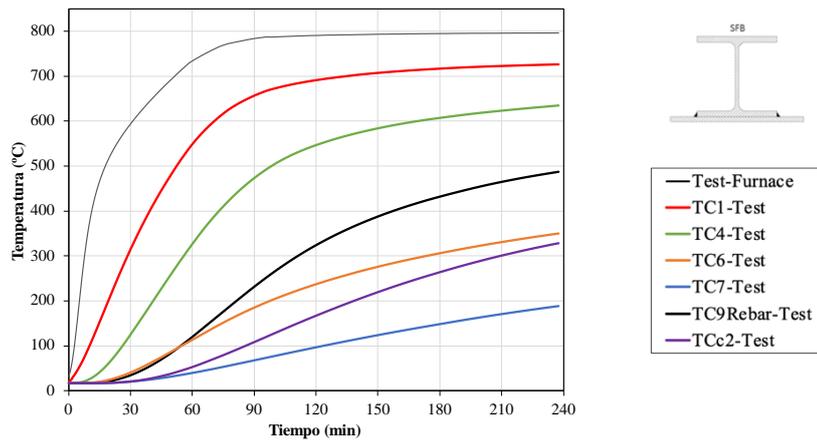
e) Ensayo SFB - A5



f) Ensayo SFB - A6



g) Ensayo SFB - A7



h) Ensayo SFB+IFB - A1vA3

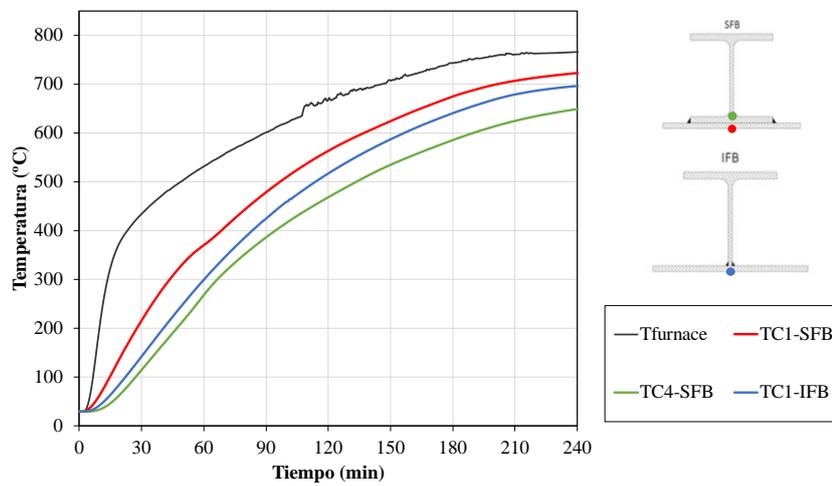


Figura 5-1 Resultados de lecturas de termopares: Ensayos de A1 a A7 y A1vA3.

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

Cabe destacar que también se ha añadido en cada gráfica de la Figura 5-1 el valor de la temperatura registrada en el horno ($T_{furnace}$), que es promedio de los termopares de placa (TP1-TP2-TP3-TP4) cuya disposición puede observarse en la Figura 4-30. Destacar aquí que el horno muestra una alta uniformidad de temperaturas, véase el ejemplo para el ensayo A1 en la siguiente figura.

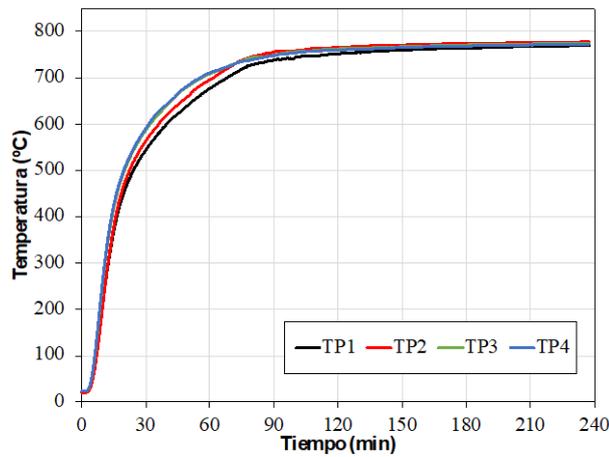


Figura 5-2 Temperatura registrada en el horno, TP1 a TP4. Ensayo A1.

Resulta también relevante comparar la evolución de la temperatura dentro del horno para los distintos ensayos realizados, Figura 5-3.

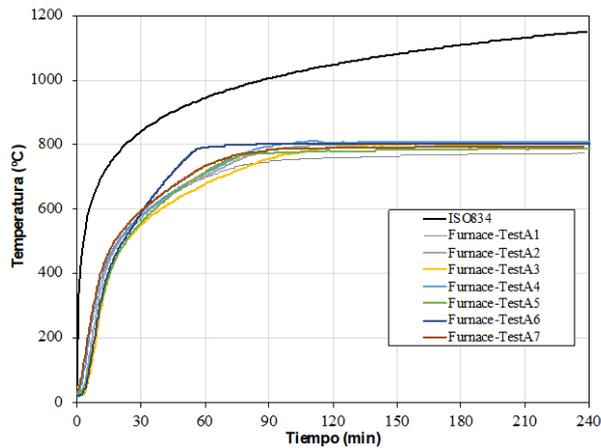


Figura 5-3 Evaluación de la temperatura en el horno. Ensayos A1 a A7.

Capítulo 5. Análisis de los resultados experimentales.

Cabe destacar que la Figura 5-3 muestra la desviación de la temperatura del horno respecto a la curva estándar ISO-834, que como se indicó con anterioridad no puede ser alcanzada debido a las limitaciones de potencia y regulación del horno. No obstante, cabe destacar que la evolución térmica en el horno es bastante similar para cada uno de los diversos ensayos, a excepción del A6 que sí muestra alguna divergencia puntual.

Con objeto de facilitar la reproducibilidad de las gráficas de la Figura 5-1, en la siguiente tabla se anotan los resultados numéricos de la evolución de los termopares para los tiempos de 30, 90 y 180 minutos de exposición a las altas temperaturas.

Tabla 5-1 Resultados de termopares: Ensayos A1 a A7 y A1vA3.

Tiempo (min)	Horno	TC1 (acero)	TC4 (acero)	TC6 (acero)	TC7 (acero)	TC9 Ø20	TCc2 H30
Test A1							
30	571	229	104	37	20	48	23
90	748	570	432	160	87	179	95
180	770	659	590	265	130	400	170
Test A2							
30	580	214	107	40	27	59	**
90	784	560	436	156	83	171	**
180	804	694	616	281	134	405	**
Test A4							
30	582	268	122	44	23	48	20
90	796	618	481	186	67	191	64
180	809	722	635	321	146	425	149
Test A5							
30	559	**	69	31	23	38	29
90	774	638	240	100	86	106	92
180	785	711	479	205	111	286	158
Test A6							
30	587	219	113	44	25	40	23
90	801	312	215	110	52	132	57
180	804	394	313	181	105	224	131
Test A7							
30	596	315	126	41	20	35	21
90	784	657	473	185	68	232	109
180	795	717	607	306	148	431	264
Test A1vA3. AI							
30	434	215	114	-	-	-	-
90	601	479	386	-	-	-	-
180	743	675	589	-	-	-	-
Tiempo (min)	Horno	TC1	TC3	TC6	-	TC8	TCc2
Test A3							
30	551	126	81	20	-	52	23
90	757	468	305	49	-	174	86
180	800	661	492	106	-	403	154
Test A1vA3. IFB							
30	434	142	-	-	-	-	-
90	601	424	-	-	-	-	-
180	743	640	-	-	-	-	-

En la tabla anterior, los resultados marcados con ‘**’ indican un registro incompleto debido a un error de lectura de los termopares instalados.

Otro modo habitual de mostrar los resultados térmicos anteriores, referidos a la evolución de la temperatura a lo largo de la sección transversal, consiste en la representación de los llamados ‘perfiles de temperatura’. Como muestra, se dibujan a continuación dichos perfiles para el ensayo A1, tras 90, 120 y 180 minutos de exposición a altas temperaturas.

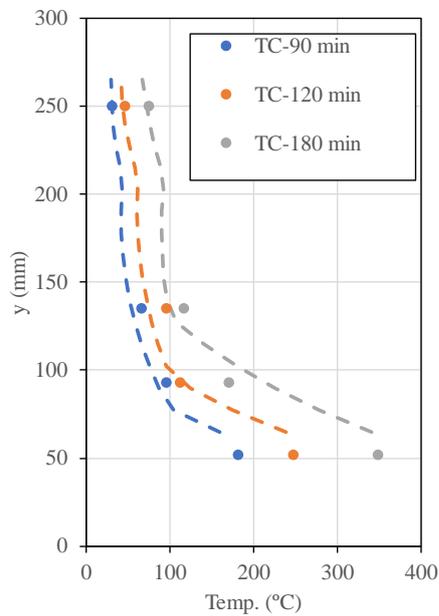


Figura 5-4 Perfiles de temperatura para el ensayo A1.

5.2. Análisis y conclusiones.

Si se comparan los resultados obtenidos en los diversos experimentos con el ensayo patrón (A1) se pueden deducir interesantes conclusiones. En primer lugar, cabe destacar que la modificación del espesor de la chapa inferior (ensayo A2) no tiene un efecto significativo sobre el calentamiento de la sección, véase Figura 5-5.

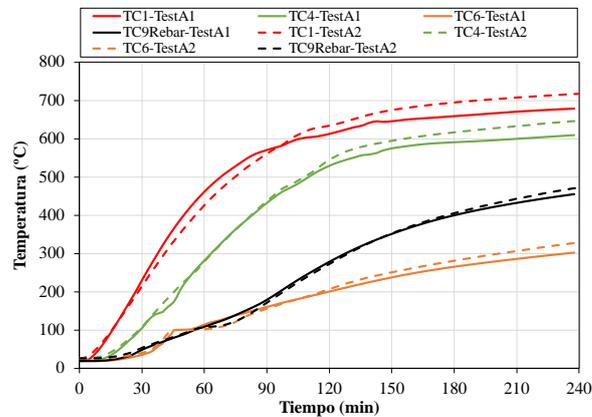


Figura 5-5 Comparación ensayos A1-A2.

En la figura anterior se han comparado únicamente, sin encontrarse grandes diferencias, las temperaturas de los puntos más significativos de la sección: La chapa inferior (TC1), la temperatura del ala inferior del perfil HEB (TC4), la del alma del perfil (TC6) y la de las armaduras (TC9Rebar).

En cuanto al ejemplar A3, cabe destacar los resultados del último ensayo A1vA3 en el que se comparan los casos A1 (SFB) y A3 (IFB) ensayados simultáneamente, véase Figura 5-1h.

En el caso de la sección SFB, se demuestra con este ensayo que la diferencia de temperatura ('gap térmico') entre la chapa inferior (TC1-SFB) y el ala inferior del perfil HEB (TC4-SFB) es de más de 100°C durante un largo periodo de tiempo, debido a que entre los dos elementos aparece la barrera térmica descrita anteriormente en el capítulo 2. Además, cabe destacar que el espacio en la junta entre la chapa inferior y el ala inferior del perfil en configuraciones SFB, no se anula sino que tiende a aumentar debido al combado por dilatación gradual "thermal bowing" que sufre la chapa inferior al calentarse más en la cara expuesta y menos al interior.

Por otro lado, para el caso de la sección IFB, la temperatura de la chapa (TC1-IFB) registró un valor intermedio a las temperaturas anteriormente citadas para el SFB (TC1-SFB, TC4-SFB). Se demuestra así mismo, que debido al efecto del gap térmico, la temperatura que llega al alma del perfil por su cara inferior resulta más baja en el caso de secciones tipo SFB que en las tipo IFB, como se ha podido comprobar experimentalmente.

Pasando al ensayo A4, en el que se empleó hormigón ligero HL-30 - con menor conductividad térmica -, puede observarse en la Figura 5-6 que en general todos los termopares presentan un mayor calentamiento que en el caso del ensayo A1.

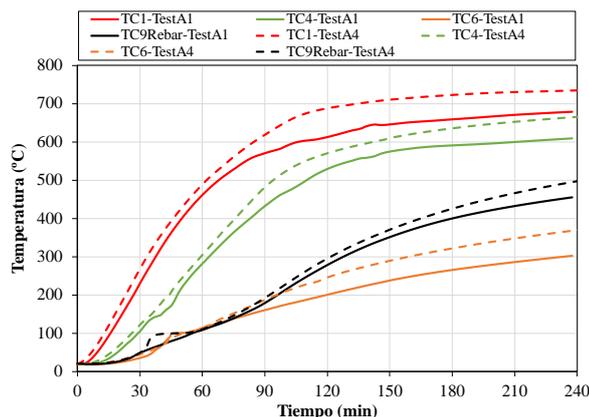


Figura 5-6 Comparación ensayos A1-A4.

Estos resultados muestran que el empleo de un hormigón de relleno con baja difusividad térmica perjudica al calentamiento de los elementos de acero y, por tanto, no sería recomendable su empleo si se persigue aumentar la resistencia al fuego de la viga mixta.

Analizando en conjunto los datos de temperatura obtenidos en los distintos casos ensayados, las diferencias más importantes, como era de esperar, se obtuvieron en los ensayos A5 (Figura 5-7) y A6 (Figura 5-8), donde se emplearon distintos materiales beneficiosos para el comportamiento térmico de la sección.

En la muestra A5 se empleó acero inoxidable en la chapa inferior soldada al perfil HEB. Como se ha demostrado en investigaciones anteriores [47, 48], el acero inoxidable posee un mejor comportamiento térmico debido a su más baja emisividad (0.4 frente a 0.7 para un acero al carbono convencional). Esto hace que la componente del flujo de calor absorbido por radiación por la viga a través de su cara expuesta sea menor, pues refleja una mayor proporción del flujo de calor incidente.

En el ejemplar A5, el ‘gap térmico’ es todavía más influyente que en los casos anteriores, debido a la baja emisividad de este material, véase la diferencia entre TC1 y TC4 en la Figura 5-7.

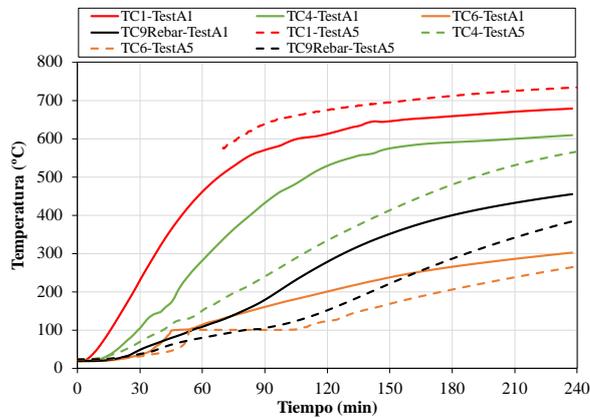


Figura 5-7 Comparación ensayos A1-A5.

Por otro lado, las temperaturas más bajas de la serie de ensayos llevados a cabo se obtuvieron en el caso A6 (véase Figura 5-8), en el que se pintó la superficie expuesta de acero con una pintura intumescente [50]. Este tipo de revestimientos posee la propiedad de reaccionar al calor a temperaturas entre 200°C - 400°C, generando un espumógeno (véase Figura 5-9) capaz de aislar térmicamente la superficie de acero que se encuentra detrás de esta barrera. Como se puede observar en la Figura 5-8, las temperaturas registradas por los termopares en este ensayo son significativamente más bajas que las del ensayo A1 de referencia, con las mismas dimensiones seccionales.

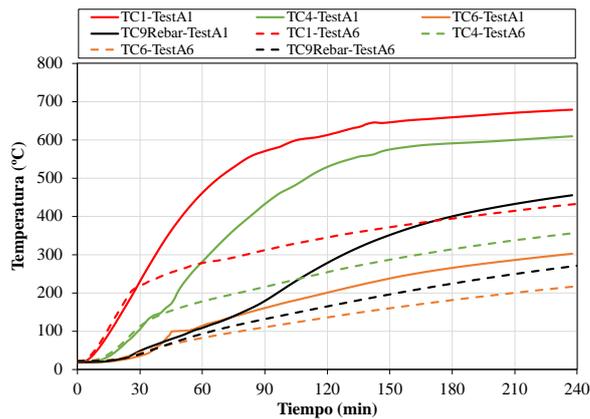


Figura 5-8 Comparación ensayos A1-A6.



Figura 5-9 Reacción de la pintura intumescente. Ensayo A6.

Por último, queda analizar el resultado del ejemplar A7, en el que se forzó la abertura del espacio entre la chapa inferior y el ala inferior del perfil HEB, interponiendo un alambre de acero de 5 mm de diámetro entre ambos elementos.

Aunque ciertamente se observa un aumento del ‘gap térmico’ a la vista de la diferencia entre TC1-TC4 (véase Figura 5-10), los resultados no son significativamente distintos al caso de referencia A1, por tanto puede considerarse que esta estrategia de protección no resulta muy efectiva.

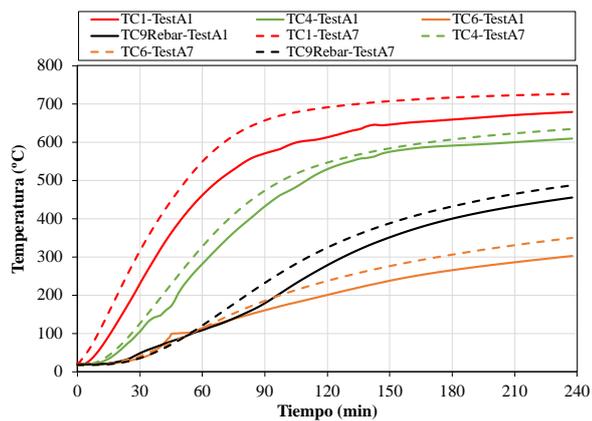


Figura 5-10 Comparación ensayos A1-A7.

Capítulo 6. Propuesta de solución innovadora

En este capítulo se presenta una solución innovadora de viga mixta diseñada específicamente para su uso en forjados mixtos planos acero-hormigón que incorpora una capa interna de material destinada a aumentar su resistencia al fuego y que no necesita ser sometida a operaciones de mantenimiento, facilitando y simplificando a su vez su rápida puesta en obra y eliminando o reduciendo las operaciones de aplicación de protección pasiva a los elementos expuestos a la acción de fuego.

6.1. La viga mixta *slim-floor* con protección inherente al fuego.

Vistos los resultados térmicos del capítulo anterior, queda de manifiesto que la solución que mejores prestaciones ofrece, proporcionando una notable reducción de la temperatura del acero, es la que posee una protección con pintura intumescente en su cara expuesta (A6).

No obstante, una desventaja del procedimiento de protección con pintura para aumentar la resistencia al fuego es que las capas de imprimación aplicadas quedan expuestas a agentes ambientales externos, lo que puede producir un deterioro de sus propiedades fisicoquímicas a lo largo del tiempo. Por esta razón, tanto las capas de material basadas en morteros aislantes, como las basadas en pinturas intumescentes, deben someterse periódicamente a operaciones de revisión y/o mantenimiento.

Así, los morteros aislantes pueden perder su adherencia con el paso del tiempo, pudiendo desprenderse del elemento de construcción al que protegen. Para evitar que esto suceda es necesario aplicar cada cierto tiempo nuevas capas de reparación de dichos materiales. Las pinturas intumescentes también se deterioran con el paso del tiempo, por lo que es igualmente necesario aplicar, de forma periódica, nuevas capas de mantenimiento.

En vista de lo anterior, sería deseable, por tanto, desarrollar vigas diseñadas específicamente para su uso en forjados plano de acero hormigón que incorporasen elementos destinados a aumentar su resistencia al fuego y que no necesitasen ser sometidos a operaciones de mantenimiento, facilitando y simplificando a su vez su rápida puesta en obra y eliminando o reduciendo las operaciones de aplicación de protección pasiva a los elementos expuestos a la acción de fuego.

Con objeto de abordar los problemas y desventajas detectados en el estado de la técnica anteriormente mencionados, se propone en esta tesis un diseño novedoso: una viga plana con resistencia al fuego intrínseca mejorada para forjados de acero-hormigón. Esta viga está formada por un perfil, laminado en caliente o armado, de acero en forma de I (o doble T), o H, con dos alas (una superior y otra inferior), mostrando el ala inferior dos vuelos simétricos a ambos lados del alma; una chapa de acero unida al ala inferior de dicho perfil, siendo la anchura de la chapa de acero, mayor que la anchura del ala inferior a la que está unida, véase Figura 6-1.

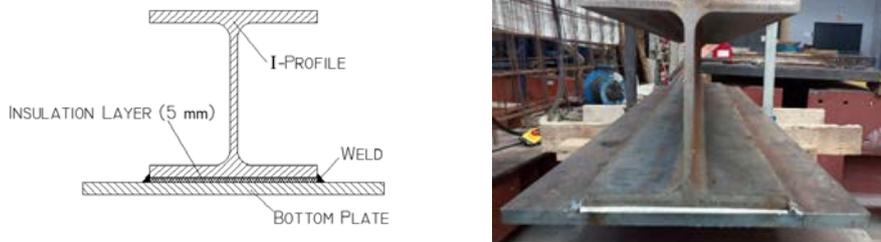


Figura 6-1 Viga mixta slim-floor con protección inherente al fuego.

Dicha viga plana con protección inherente al fuego está además caracterizada porque también comprende un recinto cerrado, formado entre dicha ala inferior y la chapa de acero y una capa aislante, dispuesta en el interior de dicho recinto cerrado y formada por un material no combustible, con una densidad en el rango de 150-600 kg/m³, una conductividad inferior a 0,11 W/mK a 600 °C y un calor específico superior a 1.000 J/kg.K.

La combinación de diferentes propiedades físicas de la capa aislante según las especificaciones anteriores se ha elegido adecuadamente para que dicha capa, además de ralentizar significativamente la transmisión de calor, también sea flexible y resistente. Esto permite que dicha capa aislante sea capaz de acompañar posibles deformaciones del perfil como las que pueden aparecer, por ejemplo, en caso de incendio.

Esta característica técnica supone una diferencia importante con respecto a los morteros proyectado de la técnica anterior utilizados en los procedimientos para aumentar la resistencia al fuego, puesto que dichos materiales, tras su fraguado y endurecimiento, presentan un comportamiento frágil.

A diferencia de las soluciones actuales, las vigas planas con resistencia al fuego inherente según la innovación presentada aquí no precisan ser sometidas a operaciones de mantenimiento, puesto que la capa aislante está alojada en un recinto cerrado, lo que la protege de los agentes ambientales externos y evitará que dicha capa aislante sufra agresiones físicas o químicas. Además, esta solución resulta estéticamente más aceptable que el uso de proyecciones, pues la capa de protección no es visible y de esta forma sólo queda a la vista la chapa inferior de acero. Además, la chapa inferior puede ejecutarse mediante aceros protegidos frente a la corrosión (galvanizados o inoxidables), si así se requiriese.

Respecto al proceso de fabricación de la viga *slim-floor* con resistencia al fuego intrínseca mejorada, este puede resumirse en tres etapas. En primer lugar, la

chapa inferior debe acondicionarse y alinearse para recibir la capa de material aislante. Se colocan dos barras cuadradas para delimitar la capa aislante (ver Figura 6-2a). El segundo paso consiste en la colocación de la capa de aislamiento sobre la chapa inferior (ver Figura 6-2b). En este paso las barras cuadradas colocadas resultan útiles para un correcto alineamiento sin necesidad de aplicar ningún tipo de adhesivo que pudiera causar problemas de combustibilidad. Finalmente, en el tercer paso el perfil de acero de la viga (en H o I) se coloca sobre la capa aislante y se suelda con cordón continuo a la chapa inferior (ver Figura 6-2c). Así la capa aislante queda alojada en una cavidad cerrada por los cordones de soldadura.

Es importante destacar aquí que, como puede observarse en el detalle de la Figura 6-2c, la acción de la soldadura no produce una quemadura significativa del material aislante, que por otro lado es incombustible. El procedimiento de fabricación descrito parece suficientemente sencillo como para ser trasladado a la industria sin gran dificultad.

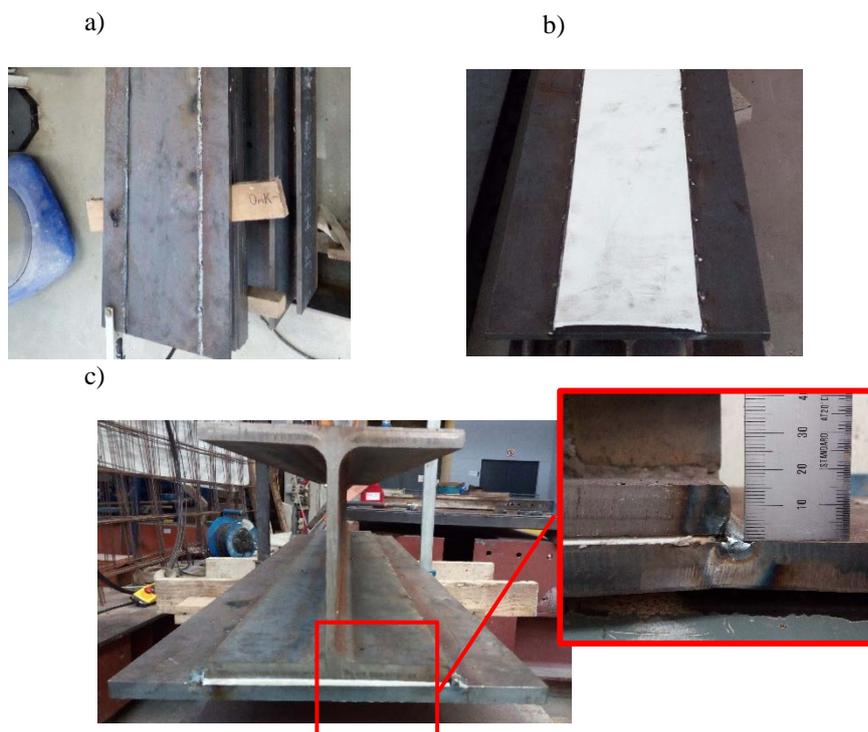


Figura 6-2 Procedimiento de fabricación de la viga slim-floor propuesta.

6.2. Verificación del comportamiento a temperatura ambiente

Como se indicó en el apartado anterior, la diferencia fundamental de la viga *slim-floor* propuesta con resistencia al fuego mejorada radica en la interposición de la capa de material aislante entre la chapa inferior de acero y el ala inferior del perfil en I o H. Así, antes de avanzar con el análisis se verificó que la inclusión de este elemento en que medida altera el comportamiento resistente del elemento a temperatura ambiente.

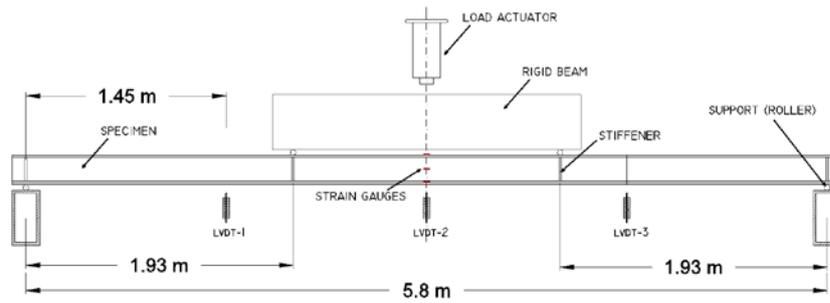
Así, se desarrolló una pequeña campaña experimental en las instalaciones de la Universitat Politècnica de Valencia para evaluar este aspecto. Concretamente se realizó el ensayo de flexión pura a cuatro puntos de dos vigas de 6 metros de longitud. Una de ellas se corresponde con la configuración *slim-floor* A1 descrita en la campaña experimental principal de este trabajo que consiste en un perfil HEB200 soldado a una chapa inferior de acero de dimensiones 360 x 15 mm. El otro ensayo, denominado a partir de aquí A9 (correlativamente a los ensayos de la campaña térmica anterior) se caracteriza por una viga de las mismas dimensiones y configuración que la A1, pero con un aislante interpuesto de 5 mm entre la chapa inferior y el ala inferior del perfil HEB 220, siguiendo el procedimiento de fabricación descrito en el apartado anterior. Ambas vigas se ensayaron sin el hormigón embebido (solo acero) y fueron fabricadas con acero de calidad S355.

La configuración real de ensayo supuso una luz libre de 5.8 metros y una distancia entre cargas de 1.93 metros, ver Figura 6-3. La condición de contorno de la viga fue biarticulada ya que los apoyos se materializaron sobre dos elementos rígidos en forma de tubo circular ('rollers'). En uno de los extremos se permitió el desplazamiento horizontal de la viga a ensayar. Destacar también que la viga se rigidizó en los puntos de apoyo y de transmisión de carga para evitar una abolladura local indeseada.

El ensayo se instrumentó con 3 transductores de desplazamiento (LVDT), dispuestos a $\frac{1}{4}$ de la luz libre, para la monitorización del desplazamiento vertical de la viga. También se colocaron 7 galgas extensométricas en la sección central, siguiendo la configuración mostrada en la Figura 6-5. En ensayo se realizó mediante un protocolo de desplazamiento controlado hasta alcanzar resistencia máxima a flexión para la que se había superado la flecha permitida tanto por el CTE o por la EAE.

Análisis experimental del comportamiento frente a altas temperaturas de vigas planas mixtas de acero-hormigón con materiales avanzados.

a)



b)

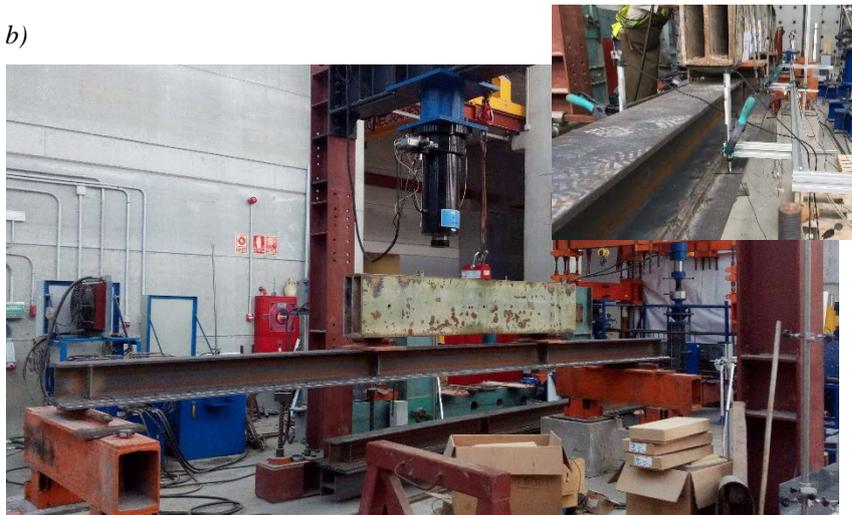


Figura 6-3 Configuración de ensayo de flexión a cuatro puntos.

Los resultados de ambos experimentos se muestran en términos de fuerza frente a desplazamiento medido en centro de vano en la Figura 6-4. Puede observarse que ambos experimentos presentan casi idéntica respuesta con un comportamiento elasto-plástico bien definido. La carga máxima en ambos casos es de aproximadamente $P_{pl} = 320$ kN.

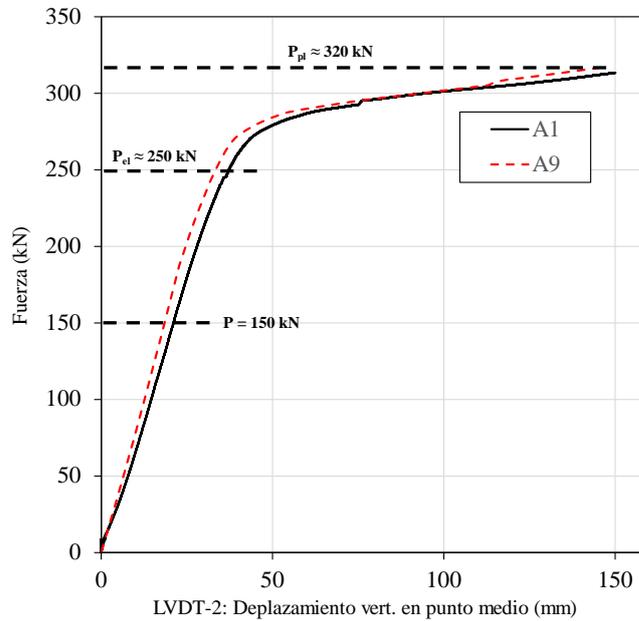


Figura 6-4 Resultados fuerza – desplazamiento.

Puede observarse que se alcanza el final del comportamiento elástico en una carga de aproximadamente 250 kN. Este valor coincide con el obtenido con la teoría de vigas clásica que se corresponde con $P_{el} = 240.1$ kN para una sección como esta, de módulo resistente $W_{el} = 652723$ mm³ y límite elástico $f_y = 355$ MPa.

Otro resultado importante que cabe destacar es que en ambos casos (A1 y A9) se desarrolla plenamente la capacidad plástica de la sección, sobrepasando ampliamente el momento elástico anteriormente citado. Esto indica que la inclusión del material aislante en A9 no compromete en ningún caso la capacidad mecánica a flexión de la viga *slim-floor* estudiada.

Finalmente, del resultado de las lecturas de las galgas extensométricas instaladas, puede obtenerse la distribución de deformaciones a lo largo de la sección. Concretamente se ha representado esta distribución para el rango elástico ($P = 150$ kN) en la Figura 6-5. Se observa en ella una distribución completamente lineal, siguiendo la teoría de vigas de Euler-Bernouilli. El factor más relevante de este comportamiento lineal radica en entender el hecho de que este resultado supone que no se produce ningún tipo de deslizamiento en la zona inferior de la sección. Así, se demuestra que la inclusión del material aislante en A9 no presenta ningún problema de transferencia de cortante entre el ala inferior del perfil en H o I y la chapa inferior

de acero, que de suceder se mostraría como un salto de discontinuidad en esta distribución de deformaciones.

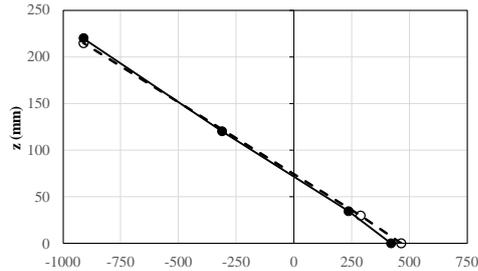


Figura 6-5 Distribución de deformaciones a lo largo de la sección.

6.3. Ensayos a altas temperaturas

De nuevo aquí se desarrolla una campaña experimental térmica, para evaluar el perfil de temperaturas a lo largo de la sección innovadora cuando la viga *slim-floor* se expone a las elevadas temperaturas de un incendio. En este caso, se emplea la misma instrumentación y configuración de ensayo descrita en el Capítulo 4 para los ejemplares A1-A7. En este caso se incluyen los nuevos ejemplares A9 y A10, véase Tabla 6-1 y Figura 6-6.

Tabla 6-1 Ensayos A9 y A10.

Grupo	Nº	Tipo	Perfil	Chapa	Relleno	Variable a estudiar
4	A9	SFB	HEB-200	15mm	H-30	Capa aislamiento
4	A10	SFB	HEB-200	15mm	H-30	Capa aislamiento +inoxidable

Estos nuevos ensayos consisten en primer lugar en una configuración idéntica a la del ejemplar A1, pero que incluye la capa de material aislante interpuesta (A9) y otra configuración que además ejecuta la chapa inferior de acero inoxidable AISI 340. En empleo del acero inoxidable en este elemento está justificado debido al resultado de algunas investigaciones recientes [47, 48] que confieren a este tipo de acero unas

propiedades mejoradas de protección frente a las altas temperaturas debido a su baja emisividad (0.4 frente a 0.7 para un acero al carbono convencional) y su acabado brillante, capaz de absorber en menor medida el calor por radiación.

Para ambas vigas el hormigón de relleno empleado fué H30 y se dispusieron los mismos termopares que en los ensayos anteriores. Realizado el seguimiento de los 4 termopares más decisivos para el registro de la temperatura en la chapa inferior (TC1), el ala inferior del HEB200 (TC2), el punto medio del alma (TC3) y las armaduras (TC4), véase Figura 6-6.

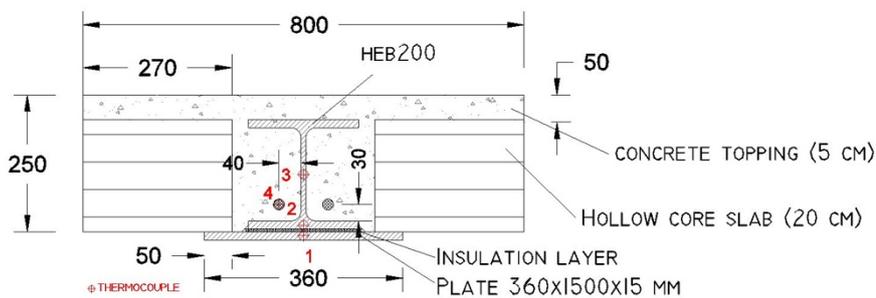
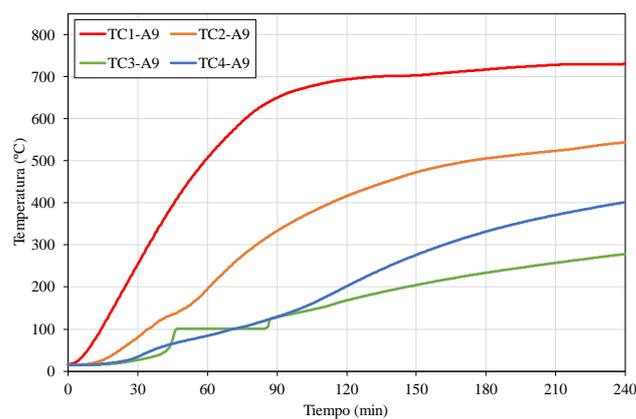


Figura 6-6 Ensayos A9 y A10.

Los resultados de ensayo para los ejemplares A9 y A10 se muestran a continuación. Debe recordarse que los resultados del ensayo A1 ya fueron expuestos en el apartado 5.1.

a) Ensayo SFB – A9



b) Ensayo SFB – A10

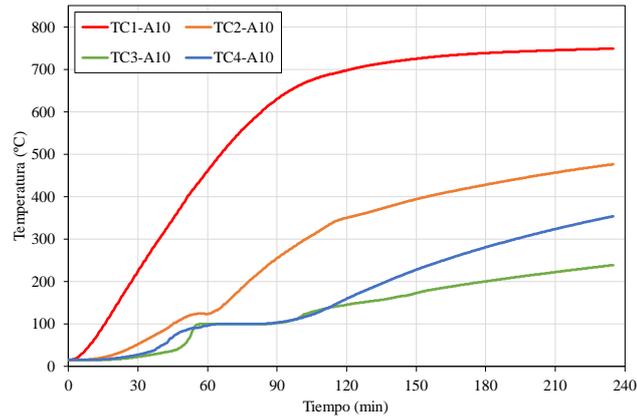


Figura 6-7 Resultados de lecturas de termopares. Ensayos A9 y A10.

Con el objeto de dar información numérica más detallada para futuros trabajos de investigación, los resultados de la Figura 6-7 también se muestran en forma de tabla para intervalos de tiempo de 30 minutos. Los registros marcados con ‘**’ indican un error de lectura del termopar.

Tabla 6-2 Resultados de termopares. Ensayos A9 y A10

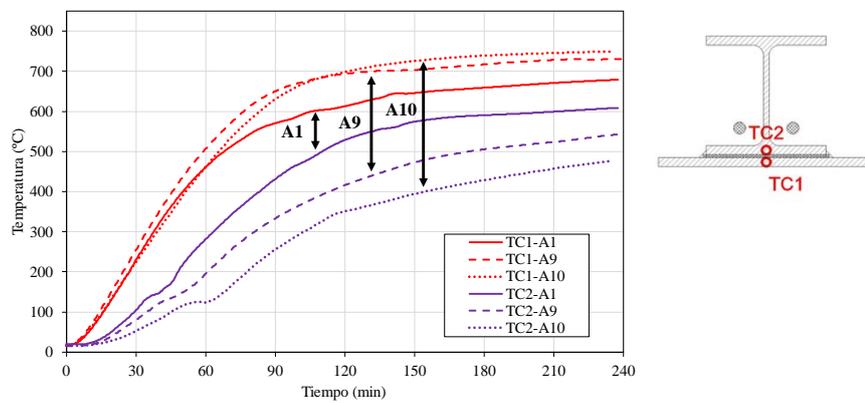
Tiempo (min)	HORNO	TC1	TC2	TC3	TC4
Test A9					
0	21	21	21	21	21
0	561	255	81	27	34
0	698	507	196	100	84
90	772	650	334	128	129
120	798	694	416	168	201
150	798	703	473	205	276
180	801	717	506	234	332
210	802/	728	524	257	371
240	802	731	545	280	404
Test A10					
0	15	15	15	15	15
30	557	225	53	23	28
60	711	461	124	**	97
90	780	631	255	103	104

Capítulo 6. Propuesta de solución innovadora.

120	785	698	350	146	160
150	786	725	395	173	228
180	789	739	429	201	281
210	790	745	457	223	324
240	790	749	477	239	354

Las temperaturas registradas en los dos ensayos presentados (A9 y A10) pueden también observarse de forma conjunta junto con el ensayo de referencia (A1) en la Figura 6-8.

a) TC1 y TC2



b) TC3 y TC4

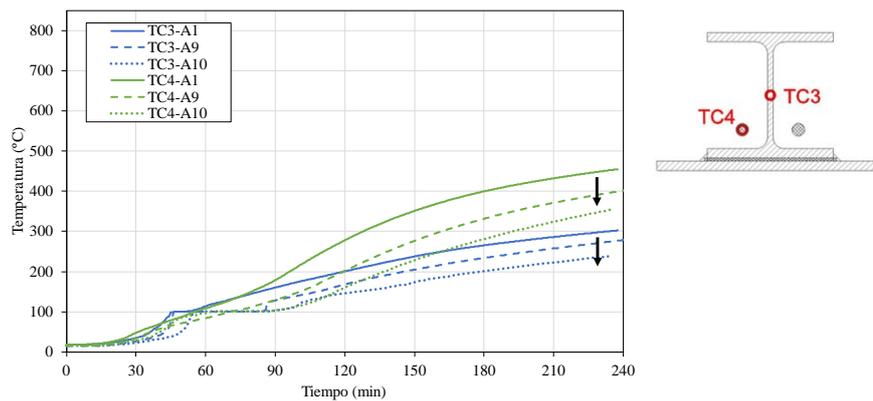


Figura 6-8 Temperaturas en A1, A9 y A10.

Se observa que el ‘gap térmico’ mostrado por la diferencia entre los termopares TC1 y TC2 se incrementa desde los 100°C para la configuración comercial habitual (A1) hasta los 200-300°C para la solución innovadora descrita en este capítulo, sin o con acero inoxidable en la chapa inferior.

Este salto o ‘gap’ térmico resulta especialmente importante para reducir la protección térmica del perfil HEB 200 y del hormigón que lo envuelve. En ese sentido se observa también en Figura 6-8b que los termopares que registran la temperatura del alma del HEB200 (TC3) y las armaduras (TC4) muestran una reducción de hasta 100°C para las configuraciones innovadoras A9 y A10.

Estos resultados confirman que las estrategias de interposición de una capa aislante entre la chapa inferior y el ala inferior del perfil HEB (A9) y la ejecución de la chapa inferior en acero inoxidable (A10) retrasan significativamente el calentamiento de la sección que se encuentra por encima dicha chapa. Este retraso en el calentamiento térmico se traduce en última instancia en una mejora del comportamiento mecánico de la sección, que como se ha demostrado en otros análisis numéricos realizados paralelamente en el marco de esta investigación [51], permite a esta tipología de vigas mixtas alcanzar hasta 60 minutos adicionales de resistencia al fuego estándar ISO834, pasando de una resistencia normalizada R60 a R120.

Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros

En esta tesis se ha estudiado el comportamiento a altas de las vigas planas mixtas acero-hormigón con tipología *slim-floor*, a través de diez ensayos térmicos realizados en un horno eléctrico donde se han probado diversas configuraciones tanto geométricas, como de materiales o de protección frente al fuego.

El conocimiento del comportamiento térmico de todas las configuraciones analizadas puede servir como base para el desarrollo de recomendaciones de diseño para el cálculo y uso de este tipo de vigas en construcción. Además, los ensayos presentados están sirviendo para la validación de modelos numéricos que permiten llevar a cabo un análisis mecánico detallado de este tipo de elementos.

Las conclusiones de esta tesis se podrían resumir en una serie de recomendaciones de diseño para mejorar el comportamiento térmico de las vigas *slim-floor* en situación de incendio:

- El comportamiento frente al fuego de la configuración SFB, con doble chapa inferior de acero, ofrece un mejor resultado térmico que la configuración IFB, (temperaturas alrededor de un 10% superiores en el perfil HEB). debido al efecto del 'gap térmico' que se produce en la interfaz de contacto entre ambas chapas. En tal caso sería preferible el uso de configuraciones SFB cuando el requisito principal de diseño sea la protección frente al fuego.
- Los materiales de relleno de baja difusividad, como el hormigón ligero, no proporcionan una mejora significativa en el comportamiento térmico de la sección. Esto se debe a que, pese a presentar unas propiedades térmicas más favorables, su disposición geométrica en la sección de viga mixta no facilita su uso en condiciones óptimas de protección para la viga de acero, produciendo un efectos adversos (temperaturas alrededor de un 10% superiores en chapa y HEB). Así, el empleo de este tipo de materiales de relleno no sería recomendable.
- La manera más eficaz para mejorar el comportamiento térmico de las vigas *slim-floor*, manteniendo en zonas no críticas la temperatura de toda la sección en situación de incendio, consiste en el empleo de una barrera térmica en la zona expuesta. En concreto, en esta tesis se ha probado el buen funcionamiento térmico de la aplicación de una pintura intumescente en la chapa inferior. No obstante, el inconveniente de esta solución radica en que requiere un

mantenimiento preventivo periódico para evitar la degradación de la capa protectora.

- En contraposición a la opción anterior, existen otras soluciones capaces de mejorar el comportamiento de la sección a altas temperaturas sin necesidad de mantenimiento. Estas alternativas consisten en el empleo de materiales de mejores prestaciones térmicas como el acero inoxidable para la fabricación de la chapa inferior. Este material proporciona una reducida absorción térmica en la cara expuesta de la viga dada su reducida emisividad y además evita los problemas de corrosión y facilita un buen acabado estético. No obstante, su principal inconveniente radica en su elevado coste.
- Por último, otra solución innovadora que ha demostrado resultar efectiva para la protección al fuego de este tipo de vigas, manteniendo un coste reducido, consiste en la interposición de una capa aislante flexible y no combustible en la interfaz entre la chapa inferior y el ala inferior del perfil en H o I . Esta solución ha sido testada en esta tesis, obteniendo resultados prometedores. Además, esta configuración mantiene la ventaja de no requerir mantenimiento a lo largo de la vida útil de la estructura.

En el ámbito de los desarrollos presentes y futuros para esta investigación, cabe destacar que la innovación descrita en el Capítulo 6 constituye la base de una solicitud realizada a la Oficina Española de Patentes y Marcas, con número de referencia P201930438 y número de publicación ES2732719 A1, que fue aprobada en el BOPI del 2 de marzo de 2021.

Además, el grupo de investigación en el que se ha elaborado esta tesis ha solicitado recientemente financiación para un proyecto de valorización y transferencia de resultados I+D de la Agencia Valenciana de Innovación (AVI) para la realización de ensayos de prototipos a escala real de las soluciones innovadoras de viga *slim-floor* con protección inherente al fuego descritas en esta tesis. Estos ensayos permitirán acercar el análisis teórico y de laboratorio realizado en esta tesis a una escala real, transferible con mayor facilidad a las empresas del sector.

Capítulo 8. Bibliografía

1. Council on tall buildings and urban habitat, C., *Tall Building Completions Maintain. Momentum in 2018. Year in review.* 2018.
2. Scott, D.A. and R. Schwab, *The Historical Development of Metallurgy*, in *Metallography in Archaeology and Art.* 2019, Springer International Publishing: Cham.
3. Dillmann, P. and M. L'Héritier, *Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes.* Journal of Archaeological Science, 2007. 34(11): p. 1810-1823.
4. Kyritsis-Spinoulas, M., et al., *Steel clamps from the acropolis: Some old, some new and some digital*, in *5th International Conference on Corrosion Mitigation and Surface Protection Technologies.* 2016, Egyptian Corrosion Society (ECS): Steigenberger Hotel - Luxor, Egypt.
5. Wermiel, S., *The Development of Fireproof Construction in Great Britain and the United States in the Nineteenth Century.* Construction History, 1993. 9: p. 3-26.
6. Panckoucke, C.J. and J. Thévin, *Encyclopédie méthodique: Arts et métiers mécaniques.* Vol. 8. 1791: Panckoucke.
7. Freitag, J.K., *The fireproofing of steel buildings.* 1899: Robert Drummond.
8. Fitzgerald, R., *The Development of the Cast Iron Frame in Textile Mills to 1850.* Industrial Archaeology Review, 1988. 10(2): p. 127-145.
9. Muller, J., *Patent: Improved construction of imbedded Metal supports for structures in which concrete or equivalent material is used, such as for floors, ceilings, roofs, stairs, bridges and the like.* Germany, 1898.
10. Gianmaria Di Lorenzo, A.F., Raffaele Landolfo, *On the Origin of I Beams and Quick Analysis on the Structural Efficiency of Hot-rolled Steel Members.* The Open Civil Engineering Journal, 2017. 11, (Suppl-1, M3): p. 332-344.
11. Schleich, J.-B. *Slim floor construction: why?* in *Composite construction-conventional and innovative.* 1997. Innsbruck, Austria: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).
12. ArcelorMittal, *Slim-Floor An innovative concept for floors*, in *Long Products Sections and Merchant Bars*, A. Europe, Editor. 2017.
13. Mullett, D.L., *Slim Floor Design and Construction.* 1992: The Steel Construction Institute.

14. Ltd, D.C.E. *Whitehall Waterfront, Leeds*. 2003; Available from: <http://dudleys.org.uk/page44.html>.
15. CEN, *EN 1994-1-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules - Structural fire design*. 2005, Comité Européen de Normalisation: Brussels, Belgium.
16. Romero, M.L., et al., *Fire design of slim-floor beams*. *Stahlbau*, 2019. 88(7): p. 665-674.
17. Romero, M.L., et al., *Fire design methods for slim-floor structures*. *Steel Construction*, 2015. 8(2): p. 102-109.
18. Rackham, J., S. Hicks, and G. Newman, *Design of Asymmetric Slimfloor Beams with precast concrete Slabs*. 2006.
19. ECCS, *Model Code on fire engineering*. 2000.
20. Both, C., J.H.H. Fellingner, and L. Twilt, *Shallow floor construction with deep composite deck: From fire tests to simple calculation rules*. *Heron*, 1997. 42(3): p. 145-158.
21. Kodur, V.K.R. and D.H. Mackinnon, *Design of concrete-filled hollow structural steel columns for fire endurance*. *Engineering Journal*, 2000. 37(1): p. 13-24.
22. Twilt, L., et al., *CIDECT design guide 4*. 1996, Germany.
23. L.B.Hunt, *The early history of the thermocouple*. *Platinum Metals Rev*, 1964: p. 23-28.
24. Maluk, C. and L. Bisby, *120 years of structural fire testing: Moving away from the status quo.*, in *2nd Fire Engineering Conference 25-26 October, 2012*. 2012: Valencia, Spain.
25. Laboratories, B.S.C.T., *BSC/FRS Fire test programme Report 6: Simply supported composite steel/concrete beam designed to CP117 Tested at full Designed Load*. 1981.
26. Laboratories, B.S.C.T., *BSC/FRS Fire test programme Report 4: Simply supported composite steel/concrete beam designed to CP117, tested at Non-Composite Load*. 1981.
27. Laboratories, B.S.C.S., *The fire resistance of a Shelf Angle Floor Construction - A BS476:Part 8 Fire Test Carried out on 3rd November, 1982*. 1983.
28. Laboratories, B.S.C.S., *The fire resistance of a Shelf Angle Floor Construction - A BS476:Part 8 Fire Test Carried out on 30th November, 1983*. 1984.

29. Laboratories, B.S.C.S., *The fire resistance of Four Shelf Angle Floor Constructions - A BS476:Part 8 Fire Tests Carried out Between 24th May 1984 and 19th December, 1984.* 1986.
30. Newman, G.M., *Fire resistance of slim floor beams.* Journal of Constructional Steel Research, 1995. 33(1-2): p. 87-100.
31. D.L.Mullett, *Design of RHS Slimflor Edge Beams.* 1997: The Steel Construction Institute.
32. Lawson, R.M., D.L. Mullet, and J.W. Rackham, *Design of asymmetric 'Slimflor' beams using deep composite decking.* 1997, The Steel Construction Institute: Berkshire, U.K.
33. Institute, T.S.C., *CORUS CSD Slimfloor Compendium.* 2008: Ascot Berkshire. p. 118.
34. Alam, N., et al., *Effect of air-gap on performance of fabricated slim floor beams in fire.* 2018.
35. Naveed Alam, A.N., Chrysanthos Maraveas, Konstantinos Tsarvdaridis, Charles Kahanji, *Effect of air-gap on response of fabricated slim floor beams in fire.* Journal of Structural Fire Engineering Structures, 2019. Vol. 10 No. 2: p. 155-174.
36. Mesquita, L., et al., *Intumescent fire protection of cellular beams,* in *X Congress on Steel and Composite.* 2015: Coimbra, Portugal.
37. Zaharia, R., et al. *Simplified method for the temperature distribution in slim floor beams.* in *Proceedings of International Conference Applications of Structural Fire Engineering.* 2011. Print Prazska technika.
38. Zaharia, R. and J.M. Franssen, *Simple equations for the calculation of the temperature within the cross-section of slim floor beams under ISO Fire.* Steel and Composite Structures, 2012. 13(2): p. 171-185.
39. Hanus, F., et al., *Analytical methods for the prediction of fire resistance of "reinforced" slim floor beams,* in *EuroSteel 2017,* E. Sohn, Editor. 2017: Copenhagen, Denmark.
40. Ellobody, E., *Composite slim floor stainless steel beam construction exposed to different fires.* Engineering Structures, 2012. 36(Supplement C): p. 1-13.
41. Tsavdaridis, K.D., C. D'Mello, and M. Hawes, *Experimental Study of Ultra Shallow Floor Beams (USFB) with Perforated Steel Sections,* in *Nordic Steel Construction Conference 2009 - NSCC2009.* 2009, Nordic Steel: Malmö, Sweden. p. 312 - 319.

42. Alam, N., et al., *Performance of Ultra Shallow Floor Beams (USFB) exposed to standard and natural fires*. Journal of Building Engineering, 2020.
43. Maraveas, C., K. Tsavdaridis, and A. Nadjai, *Fire Resistance of Unprotected Ultra Shallow Floor Beams (USFB): A Numerical Investigation*. Fire Technology, 2016. 53.
44. Fellingner, J.H.H. and L. Twilt, *Fire resistance of slim floor beams*, in *Composite Construction in Steel and Concrete III*. 1996, American Society of Civil Engineers: Irsee, Germany.
45. Ahmed, I.M. and K.D. Tsavdaridis, *The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and eurocode design approaches*. Journal of Constructional Steel Research, 2019. 155: p. 286-300.
46. Wermiel, S., *The Development of Fireproof Construction in Great Britain and the United States in the Nineteenth Century.pdf*>. Construction History, 1993. 9: p. 3-26.
47. Gardner, L., et al., *Elevated temperature material properties of stainless steel alloys*. Journal of Constructional Steel Research, 2010. 66(5): p. 634-647.
48. Chen, J. and B. Young, *Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures*. Engineering Structures, 2006. 28(2): p. 229-239.
49. Renaud, C., *RFS-04048 "Stainless Steel in Fire". WP 2: Composite members in fire. Final Report*. 2007, CTICM.
50. Li, G.Q., J. Han, and Y. Wang, *Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results*. Vol. 35. 2017. 073490411769385.
51. Albero, V., et al., *Internally fire protected composite steel-concrete slim-floor beam*. Engineering Structures, 2021. 227: p. 111447.

Anexo. Producción científica

A raíz de la investigación realizada durante la esta tesis, el autor ha participado en la publicación de los siguientes artículos y conferencias de congreso:

Artículos en revista científica

Albero, V., **Serra, E.**, Espinós, A., Romero, M.L., Hospitaler, A. “Internally fire protected composite steel-concrete slim-floor beam” (2021) Engineering Structures, 227, art. no. 111447. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111447

Albero, V., **Serra, E.**, Espinós, A., Romero, M.L., Hospitaler, A. “Innovative solutions for enhancing the fire resistance of slim-floor beams: Thermal experiments” (2020) Journal of Constructional Steel Research, 165, art. no. 105897. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105897

Albero, V., Espinós, A., **Serra, E.**, Romero, M.L., Hospitaler, A. “Numerical study on the flexural behaviour of slim-floor beams with hollow core slabs at elevated temperature” (2019) Engineering Structures, 180, pp. 561-573. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.061

Ponencias en congresos

Albero, V., Espinós, A., **Serra, E.**, Romero, M.L., Hospitaler, A. “Experimental study on the thermal behaviour of fire exposed slimfloor beams” (2018) 12th International conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018), Valencia, Spain.

Patentes

Los resultados de esta investigación han permitido la solicitud de una patente, de la cual el autor de esta tesis y sus directores son autores, en la Oficina Española de Patentes y Marcas, con número de referencia P201930438 y número de publicación ES2732719 A1, que fue aprobada en el BOPI del 2 de marzo de 2021.