

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2017

MEMORIA DEL PROYECTO Nº 20

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Estudio y caracterización de la resistencia al fuego de forjados ligeros colaborantes

Investigador/a/es responsable/es: Felipe Pedro Álvarez Rabanal

Tfno: 985 18 19 55

E-mail: alvarezfelipe@uniovi.es

Otros investigadores: Antonio Navarro Manso

Empresas o instituciones colaboradoras:

WEBER Saint-Gobain, sita en Área Empresarial Andalucía, Sector 1 C/de las Marismas 11, 28320 Pinto (Madrid). Esta multinacional es líder mundial en la fabricación de morteros industriales para colocación y rejuntado de cerámica, revestimiento y rehabilitación de fachadas. La colaboración de esta empresa con el grupo investigador se centrará en la aportación de los **materiales** necesarios para la construcción de los hormigones ligeros de los forjados colaborantes a estudiar en base a los cuales se realizarán los ensayos para su caracterización de resistencia al fuego.

Prefabricados Industriales del Norte (PRENOR S.L.), ubicada en Carbainos – Cenero, 33392 Gijón (Asturias). Esta empresa asturiana con sede en Gijón posee una gran experiencia en proporcionar a sus clientes un servicio integral de cálculo y construcción de diferentes estructuras prefabricadas en edificación y obra civil. Su colaboración en este proyecto se centrará en el apoyo y asesoramiento de su equipo técnico y profesional sobre la **fabricación** de los forjados ligeros colaborantes necesarios para la realización de los ensayos de resistencia al fuego.

Oficina Técnica Astur (O.T.A.), ubicada en c/ Canga Arguelles 14 Bajo, 33202 Gijón (Asturias). Esta empresa posee una gran experiencia en proporcionar a la industria un servicio integral de calibración, montaje, puesta en marcha, mantenimiento y asesoramiento en la realización de diferentes ensayos. Su colaboración en este proyecto se centrará en apoyo y asesoramiento sobre aspectos técnicos relacionados con la instrumentación necesaria para la realización de los **ensayos**, así como el suministro de las especificaciones técnicas de los equipos de medida utilizados en los ensayos del proyecto.

2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

2.1 Resumen ejecutivo

El proyecto aborda el estudio, tanto experimental como numérico, de la resistencia al fuego de hormigones ligeros estructurales (HLE) con secciones de acero de pared delgada.

En la actualidad existen secciones metálicas de pared delgada que presentan problemas de estabilidad y que han dado lugar a fallos estructurales de importancia. Este hecho, nos ha impulsado a realizar el presente proyecto con el fin de conseguir productos que permitan un importante ahorro energético consiguiendo un mejor aprovechamiento de este tipo materiales y estructuras. Uno de los factores más influyentes en la poca utilización de los forjados mixtos con HLE es la escasa información disponible sobre sus propiedades, tanto térmicas como estructurales y de resistencia al fuego.

En conclusión, la falta de información y de una normativa claramente definida influye decisivamente en el poco uso en construcción masiva para la edificación de estructuras mixtas de acero y hormigón. Asimismo, el comportamiento de este tipo de estructuras bajo la acción del fuego, dado que resisten unos 30 min por lo general, hacen necesaria su caracterización mediante la realización de ensayos de resistencia al fuego con el fin de determinar que elementos de protección adicionales se deben utilizar.

Los beneficiarios del desarrollo del proyecto serían, por un lado, algunas empresas locales, tales como PRENOR y Oficina Técnica Astur, interesadas tanto en la caracterización de este tipo de elementos como en el estudio de las metodologías de ensayo de resistencia al fuego de elementos constructivos.

Es necesario hacer referencia a que el equipo investigador lleva más de 10 años trabajando en el estudio de estructuras por medio de simulaciones numéricas y ensayos experimentales de laboratorio, y que ha diseñado y construido un equipamiento para la realización de ensayos de resistencia al fuego en el campus de Gijón.



Figura 1. Horno utilizado para la realización de los ensayos (Localización: Edificio De Servicios Comunes de Investigación, E.P.I. de Gijón)

La temática planteada posee gran interés para varias entidades, tanto del sector público como privado, lo cual justifica el interés en llevar a cabo este proyecto. Respecto a los beneficios inmediatos potencialmente generables para el Municipio de Gijón o la administración pública local, serían los siguientes:

- Las estructuras mixtas son estructuralmente más eficientes, ya que explotan la resistencia a la tracción del acero y la resistencia a compresión del hormigón, mejorando tanto su resistencia como su rigidez.
- La rigidez y el peso reducido de estas estructuras facilitan su transporte, almacenamiento e instalación, permitiendo una mayor simplicidad y rapidez en la construcción (periodos de tiempo más reducidos). Sencillez y economía de estructura (minimización del uso de material).
- Sustituye al encofrado perdido tradicional de madera como soporte al vertido de hormigón.
- Dota de una gran flexibilidad a la edificación, ya que las estructuras mixtas son adaptables y modificables durante la vida del edificio, sobre todo cuando actúan en colaboración con estructuras de acero.
- Es necesaria una menor construcción in situ debido a la fabricación industrializada de las secciones de acero, lo que permite también obtener tolerancias más estrictas y establecer un procedimiento de calidad.

- Los distintos perfiles de acero pueden permitir el ahorro de hasta un 30% de hormigón, en función de su diseño. Esta reducción en el peso propio produce una reducción significativa de la carga que soporta la estructura, dando lugar a una construcción más ligera que un edificio tradicional de hormigón.
- La mayor rigidez de los forjados mixtos permiten que éstos puedan ser más delgados para una misma luz, conduciendo a bajar alturas de piso y a ahorros en el coste de revestimiento.
- Reciclabilidad total de todos los elementos que componen los forjados mixtos.
- Mayor durabilidad que los sistemas constructivos tradicionales.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

El presente proyecto tiene como objetivo básico el estudio del comportamiento de resistencia al fuego encaminado al desarrollo industrializado de nuevos forjados mixtos de altas prestaciones, y en los que se van a emplear conjuntamente secciones de acero de pared delgada cubiertas por una capa de hormigón ligero.

Como objetivos iniciales del proyecto, se plantearon:

1. El establecimiento de procedimientos numéricos y de ensayo en laboratorio para la determinación de las propiedades de resistencia al fuego de estructuras mixtas. **Grado de consecución:** se han logrado establecer procedimientos de ensayo en laboratorio de la resistencia al fuego de estructuras mixtas, y se han desarrollado innovadores modelos numéricos acoplados térmico-estructurales.
2. La validación experimental del procedimiento numérico desarrollado durante el diseño mediante la construcción y el ensayo de prototipos y modelos a escala. **Grado de consecución:** se han construido los prototipos y modelos a escala de los forjados mixtos colaborantes para realizar la caracterización de su resistencia al fuego en horno de ensayo, lo que ha permitido la validación de los modelos numéricos con los resultados obtenidos.
3. La adecuación y mejora de la actual normativa de solicitaciones al fuego sobre este tipo de estructuras, de forma que resulte mucho más acorde con el comportamiento real de las mismas. **Grado de consecución:** los resultados obtenidos en los ensayos realizados permitirán adecuar la normativa al comportamiento resistente al fuego de estas estructuras.
4. Por último, promocionar el uso racional de la energía y el aprovechamiento de los recursos con el fin de prevenir el cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero. **Grado de consecución:** se ha realizado la divulgación de los resultados obtenidos en los ensayos sobre los forjados ligeros colaborantes en la IV FIRE ENGINEERING CONFERENCE celebrada en Valencia durante el mes de diciembre de 2016, promocionando el uso de este tipo de forjados. También se ha presentado un artículo en el CONGRESS ON NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING - CMN 2017, celebrado en Valencia.

2.3 Tareas realizadas

Durante la ejecución del proyecto se ha procedido a realizar la tarea que se exponen a continuación:

- 1) **Recogida de documentación y estudio del estado del arte.** Se realizó un estudio sobre los diferentes métodos y normativas utilizadas en la realización de los ensayos de resistencia al fuego de los diferentes elementos constructivos que conforman un edificio.

La normativa consultada para la realización de los ensayos ha sido la siguiente:

- UNE-EN 1363-1: 2015
- UNE-ENV 13381-5: 2005

El horno de ensayos debe ser capaz de proporcionar las condiciones normalizadas de exposición al fuego tanto en su aspecto térmico con la aplicación de la curva de tiempo-temperatura indicada en la norma como en las condiciones de presión interna.

La losa colaborante debe ser sometida durante el ensayo de resistencia al fuego a una carga constante equivalente al 60% de su carga de rotura, la cual deberá determinarse previamente mediante la realización de ensayos de flexión. Se debe mantener constante la carga ($\pm 5\%$), sin cambios en su distribución, hasta el fallo de su capacidad portante. La magnitud y distribución de la carga debe ser tal que el momento causado por la carga aplicada y el peso de las vigas o placas de distribución de carga, represente el 60% de la resistencia a la flexión de cálculo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$M_{p,Rd} = N_{cf} z + M_{pr}$$

donde

$$z = h_t - 0,5h_c - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{A * f / \gamma}$$

M_{pr} : es el momento resistente plástico reducido de la chapa dado por:

$$M_{pr} = 1,25M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{A * f / \gamma} \right)$$

$$N_{cf} = h_c b (0,85f_{ck} / \gamma)$$

donde:

M_{pa} : es el valor de cálculo del momento resistente plástico de la sección eficaz de la chapa;

e_p : es la distancia de la fibra neutra plástica del área eficaz de la chapa de acero a su cara inferior;

e : es la distancia del centro de gravedad del área eficaz de la chapa de acero a su cara inferior;

h_t : es el canto total de la losa;

A : es el área eficaz de la chapa metálica en tracción;

b : es el ancho de la sección transversal considerada;

f_{ck} : es la resistencia característica del hormigón a compresión;

γ : es el coeficiente de seguridad parcial;

f : es el límite elástico característico;

La carga se debe aplicar simétricamente a la muestra a lo largo de 2 líneas de carga transversales, cada una a una distancia $L_{sup}/4$ de cada uno de los apoyos. La proporción de la carga total aplicada en cada posición será $P/2$, según lo especificado en la figura 1. La carga debe producir esfuerzos que se aproximen a los de una carga uniformemente distribuida. Las cargas puntuales se deben transferir a la muestra a través de vigas o placas de distribución de carga (figura 2).

En nuestro caso, debido a falta de espacio, se colocó una carga P transversalmente situada a una distancia $L_{sup}/2$, de manera que el momento flector resultante sería el mismo que aplicando 2 líneas de carga transversales.

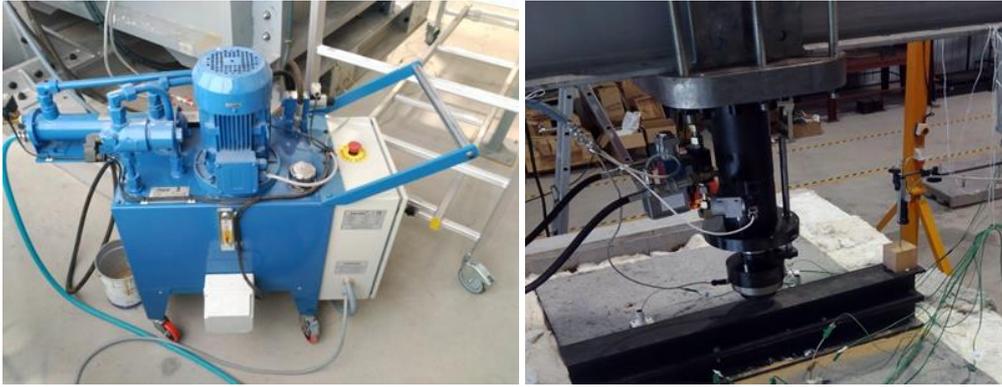


Figura 2. Equipo utilizado para la aplicación de la carga: equipo hidráulico (izquierda) y actuador (derecha)

Los termopares del horno deben ser **termómetros de placa** que consisten en un conjunto de una placa de aleación de níquel plegado con un termopar fijado a él y material aislante. La placa de metal debe estar formada por una banda de aleación de níquel austenítico con resistencia a la oxidación a altas temperaturas, de (150 ± 1) mm de longitud por (100 ± 1) mm de ancho por $(0,7 \pm 0.1)$ mm de espesor tal y como se muestra en la figura 3. El conjunto de medida debe consistir en la unión de dos hilos níquel-cromo/níquel-aluminio (tipo K), contenidos en un material aislante de tipo mineral (en este caso lana cerámica). El conjunto de la placa y el termopar debe estar provisto de una pieza de material aislante inorgánico, nominalmente de (97 ± 1) mm por (97 ± 1) mm y con espesor (10 ± 1) mm.

En cualquier momento, tras los 10 primeros minutos del ensayo, la temperatura registrada por cualquier termopar en el horno no se diferenciará de la temperatura normalizada correspondiente en ese instante a más de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura del horno tomada por los termopares específicos debe seguir la siguiente ecuación:

$$T = 345 \log_{10} (8t+1) + 20$$

Donde:

T es la temperatura del horno, en grados Celsius.

t es el tiempo en min.

El porcentaje de desviación admitido respecto de la temperatura indicada en la Norma será del 15% para $5 < t \leq 10$, del $[15 - 0,5(t-10)]\%$ para $10 < t \leq 30$, del $[5 - 0,083(t-30)]\%$ para $30 < t \leq 60$, y del 2,5% para un $t > 60$.

Durante el ensayo se situarán una serie de estaciones de medida en el elemento a ensayar en las posiciones indicadas en la figura 4. En estas estaciones de medida se situarán una serie de termopares:

- Fijados en la superficie del elemento: serán discos de cobre fijados preferiblemente en la superficie del elemento mediante el uso de adhesivos resistentes al calor, evitando la presencia de este entre el disco de cobre y la muestra o entre el disco de cobre y el taco aislante.
- En el interior del elemento: se situarán termopares tipo k a distintas profundidades del elemento a medir (embebidos en el hormigón), desde la parte inferior del mismo (en contacto con la parte interior de la chapa de acero) hasta unos 50 mm de la parte superior del elemento.

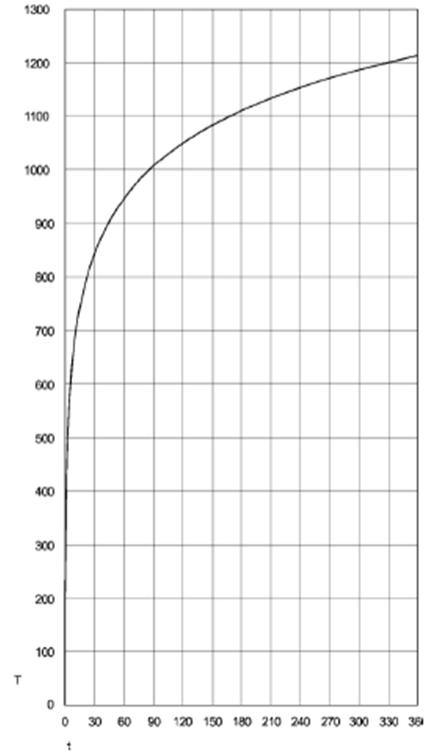


Figura 3. Termopares de placa utilizados en las mediciones (izquierda) y curva temperatura-tiempo indicada en la Norma (derecha)

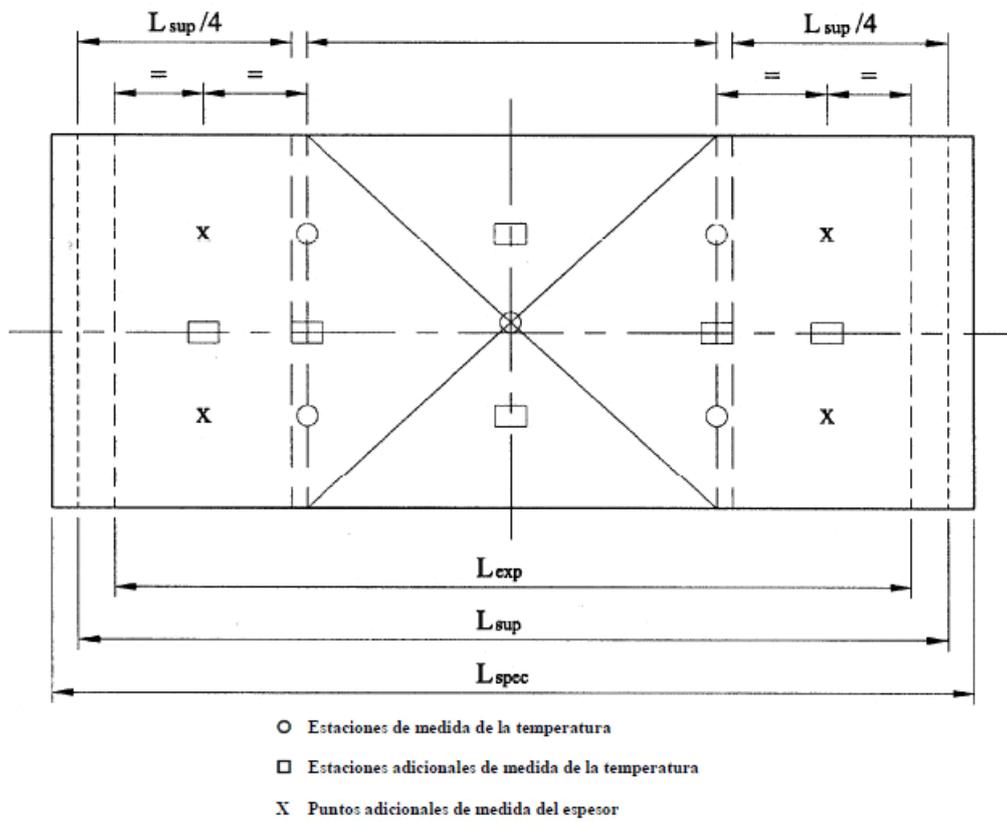


Figura 4. Estaciones de medida indicadas en la norma

- 2) **Fabricación de los forjados colaborantes.** En este apartado se completó la fabricación de una serie de forjados con unas dimensiones de 2030x1120x160 mm con diferentes dosificaciones, concretamente 4 tipos diferentes de hormigón, una de hormigón normal (HN) y 3 de hormigón ligero estructural reforzados con fibras de poliolefinas (HLE LSDur 23, 28 y 37). La elaboración de los mismos se llevó a cabo en el Barrio de Carbinos, concejo de Gijón por la empresa Prefabricados Industriales del Norte S.A. (PRENOR), algunas de cuyas fases se pueden observar en la figura 5. Las características mecánicas de estos hormigones se caracterizaron mediante ensayos de resistencia a compresión y de módulo elástico.



Figura 5. Fabricación de los forjados mixtos

Se fabricaron las losas necesarias, tanto para la realización del ensayo para determinar su resistencia estructural (Figura 6) como para el ensayo de resistencia al fuego (Figura 7).

Para la medición las temperaturas en los diferentes puntos de la losa, se insertaron 12 tubos embebidos en el hormigón a diferentes profundidades (cuatro por estación de medida) donde se ubicaron los 12 termopares durante el ensayo de resistencia al fuego.

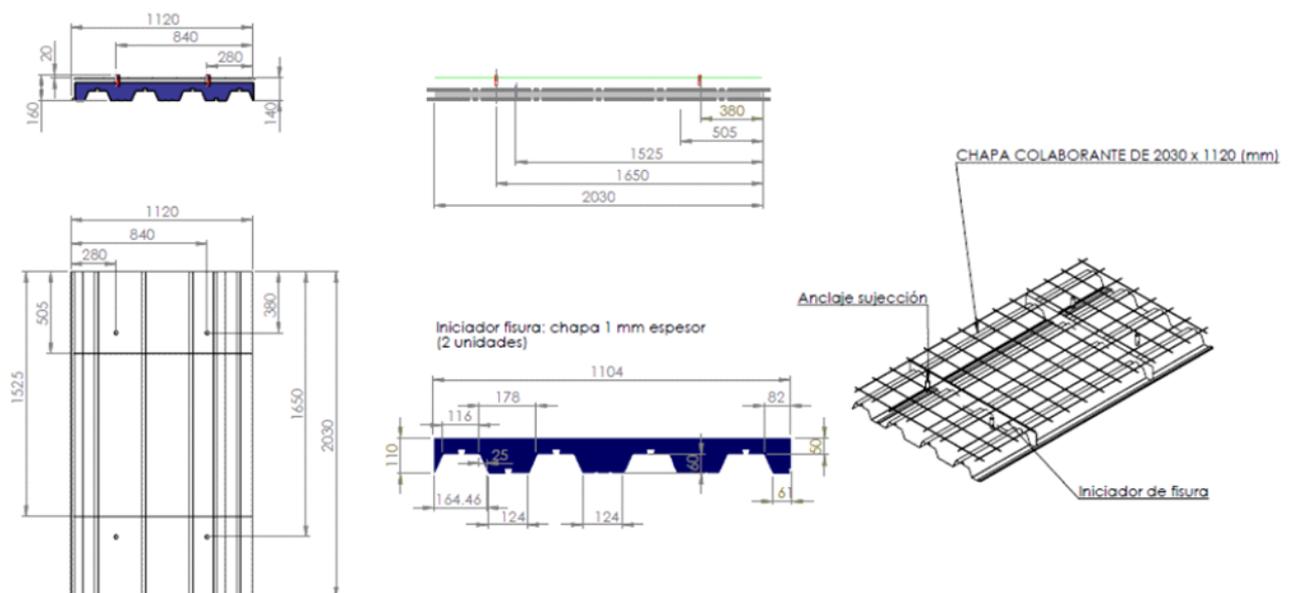


Figura 6. Plano detalle para fabricación losas mixtas (ensayo estructural)

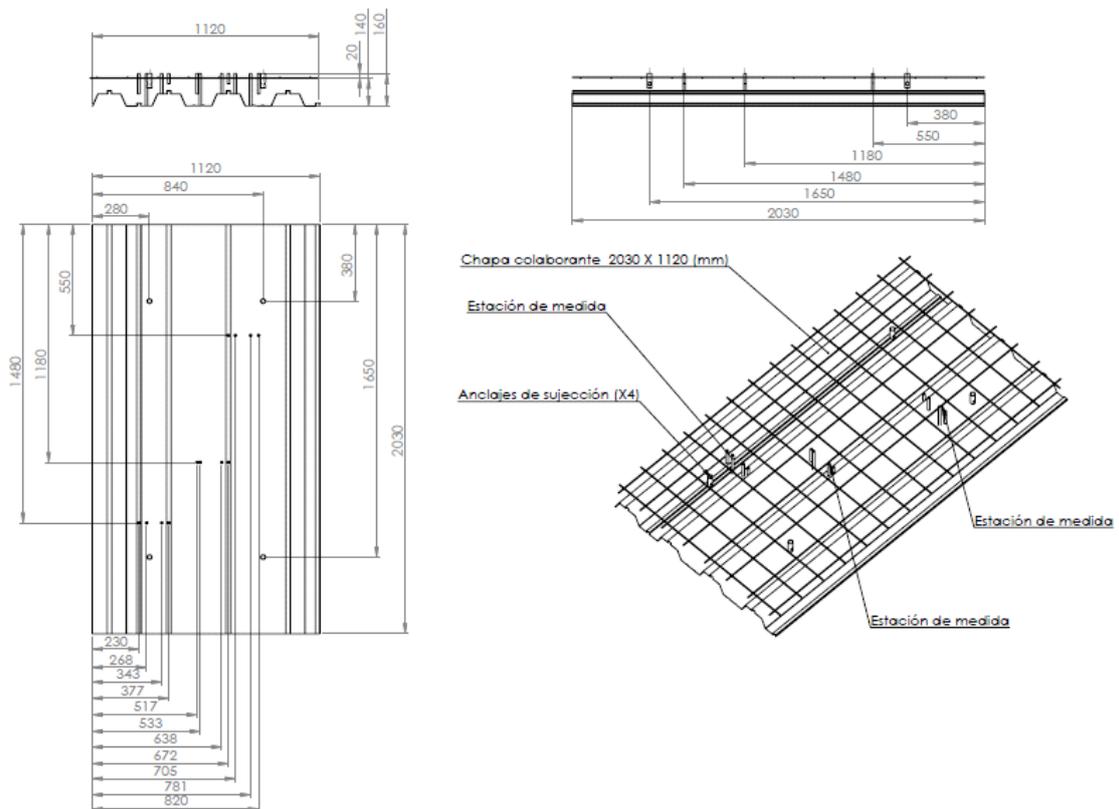


Figura 7. Plano detalle para fabricación losas mixtas (ensayo de resistencia al fuego)



Figura 8. Tubos utilizados (izquierda) y ubicación en la losa (derecha)

3) Realización de ensayos en el laboratorio con el fin de determinar el comportamiento al fuego de los forjados colaborantes.

- Las características de estos hormigones se caracterizaron mediante **ensayos de resistencia a compresión y de módulo elástico** (ver resultados en Tabla1).
- La capacidad portante de los forjados colaborantes se determinó mediante la realización de **ensayos de flexión a 4 puntos** (ver figura 9 y resultados en Tabla1).

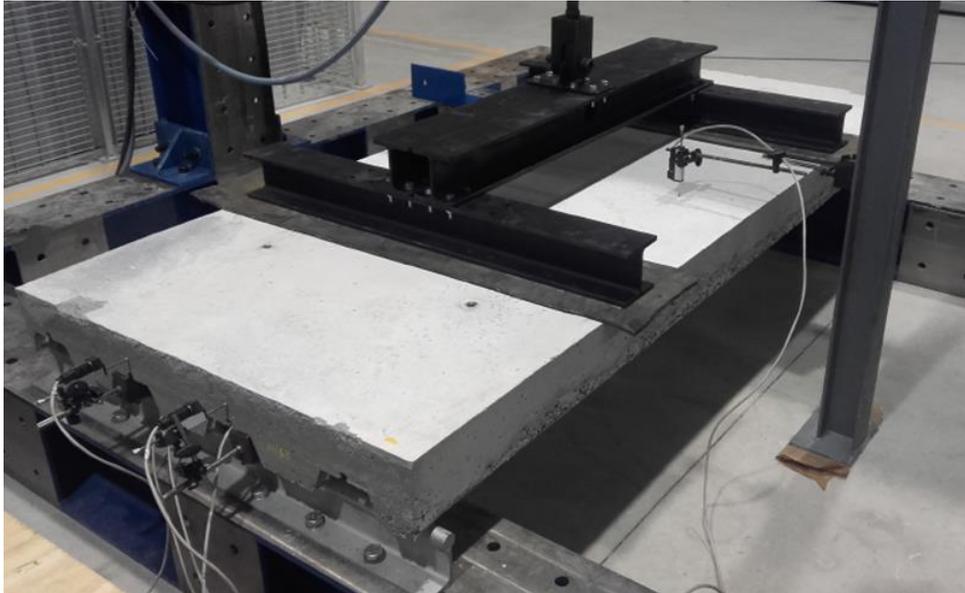


Figura 9. Ensayo de flexión sobre losa colaborante

- El comportamiento al fuego de los forjados colaborantes se determinó mediante la realización de **ensayos de resistencia al fuego**. La metodología utilizada es la que se expone a continuación.

Para medir la temperatura tanto en la superficie no expuesta del forjado como en las diferentes profundidades indicadas en la norma, se utilizan termopares de temperatura (Figura 10). Estos sensores se colocan en la misma posición (estaciones de medida) para todas las losas estudiadas con el fin de comparar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

La carga sobre las losas se aplica mediante un actuador sobre una viga transversal apoyada sobre una lámina de caucho que permite el reparto uniforme de la carga (Figura 10). Se aplica una carga constante equivalente al 60% de la que determina la capacidad portante del forjado durante los 15 minutos previos al comienzo del ensayo de resistencia al fuego y durante la realización del mismo.

Se colocó además un sensor de desplazamiento para saber en cada instante el desplazamiento sufrido por la viga bajo la acción de la fuerza aplicada por el actuador hidráulico y el fuego (Figura 11). Según se indica en la norma, un desplazamiento vertical superior a los 60 mm determinará el límite de la capacidad portante del forjado.

Todos estos sensores estarán conectados a diferentes equipos de medición de la casa HBM (Figura 11), los cuales estarán conectados a un ordenador donde se registraron todos los datos de las temperaturas de forma síncrona durante la realización del ensayo utilizando el software CATMAN EASY de HBM.

Para determinar visualmente la variación de temperaturas en la superficie no expuesta de la losa ensayada se ha utilizado una cámara termográfica (Figura 12) que enfoca una sección transversal de la losa ensayada. En estas imágenes se muestra la influencia del espesor de hormigón en cada zona.



Figura 10. Sensores de temperatura (izquierda) y aplicación y distribución de la carga (derecha)



Figura 11. Detalle del transductor de desplazamiento (izquierda) y equipos utilizados para el registro de datos (derecha)



Figura 12. Detalle de la cámara termográfica empleada (izquierda) y visualización de la imagen térmica captada durante el ensayo (derecha).

4) Realización de modelos numéricos y validación con los resultados experimentales. Para la realización de los modelos numéricos se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos (FEM), el cual convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número limitado de puntos e interpola la

solución al resto del dominio, resultando finalmente una solución aproximada. En este apartado se desarrolló y completó un modelo acoplado térmico-estructural (ver figura 13), permitiendo calibrar el modelo numérico con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. Los modelos de simulación desarrollados en este proyecto, acoplan un modelo transitorio térmico y un modelo estático estructural.

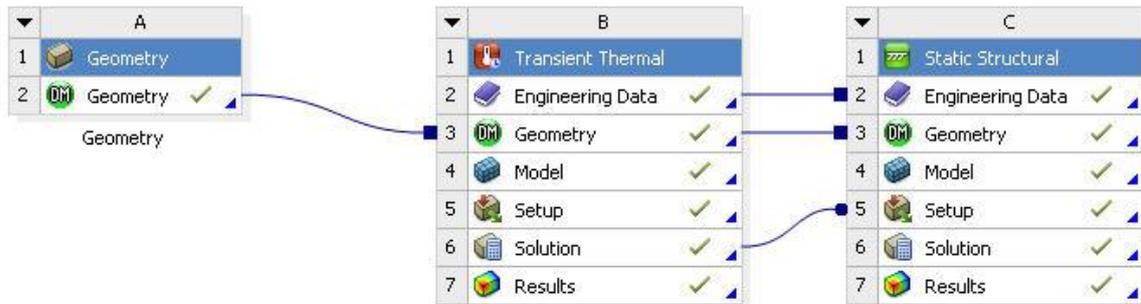


Figura 13. Representación del proceso de simulación llevado a cabo por ANSYS.

Con el fin de agilizar los cálculos y alcanzar la convergencia, se simuló una tercera parte de la muestra de ensayo en su sección longitudinal, obteniéndose una mejor calidad de mallado para así lograr unos resultados más precisos. En la figura 14 se puede observar la geometría final utilizada y un detalle del mallado realizado.

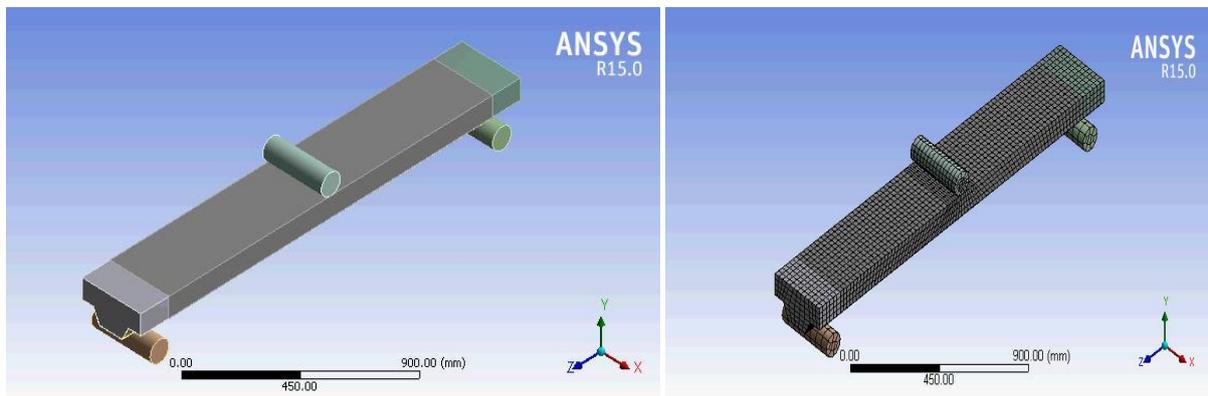


Figura 14. Geometría (izquierda) y malla (derecha) utilizada para el modelo numérico.

Análisis térmico

Se realizó un estudio térmico transitorio, con el fin comprobar la influencia de la temperatura en el comportamiento de los forjados colaborantes y para su posterior validación mediante comparativa con las temperaturas obtenidas en los ensayos experimentales (se ha comparado las diferentes temperaturas obtenidas en los modelos con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales en diferentes puntos de la losa y chapa mediante los termopares tipo k embebidos dentro del hormigón).

A continuación, se muestran las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno aplicadas para este tipo de ensayo y posteriores cálculos.

Propiedades del material

- Conductividad térmica hormigón normal (HN) $k_{hor} = 2 \text{ W/mK}$
- Conductividad térmica HLE-LSDur-23 (HLE-23) $k_{hle23} = 1,54 \text{ W/mK}$
- Conductividad térmica HLE-LSDur-28 (HLE-28) $k_{hle28} = 1,56 \text{ W/mK}$
- Conductividad térmica HLE-LSDur-37 (HLE-37) $k_{hle37} = 1,65 \text{ W/mK}$
- Conductividad térmica acero $k_{ac} = 60.5 \text{ W/mK}$
- Coeficiente de emisividad acero $\epsilon = 0.3$

Condiciones de contorno

- Coeficiente convección interior $h_{int} = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ según lo establecido en el anejo 8 de la norma "Instrucción de Acero Estructural" (EAE).
- o Coeficiente convección exterior $h_{ext} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ en cumplimiento del código técnico de la edificación (CTE).
- o Curva temperatura-tiempo – definida en la norma UNE-EN 1363-1: 2012- aplicándose a las caras inferiores de la muestra.

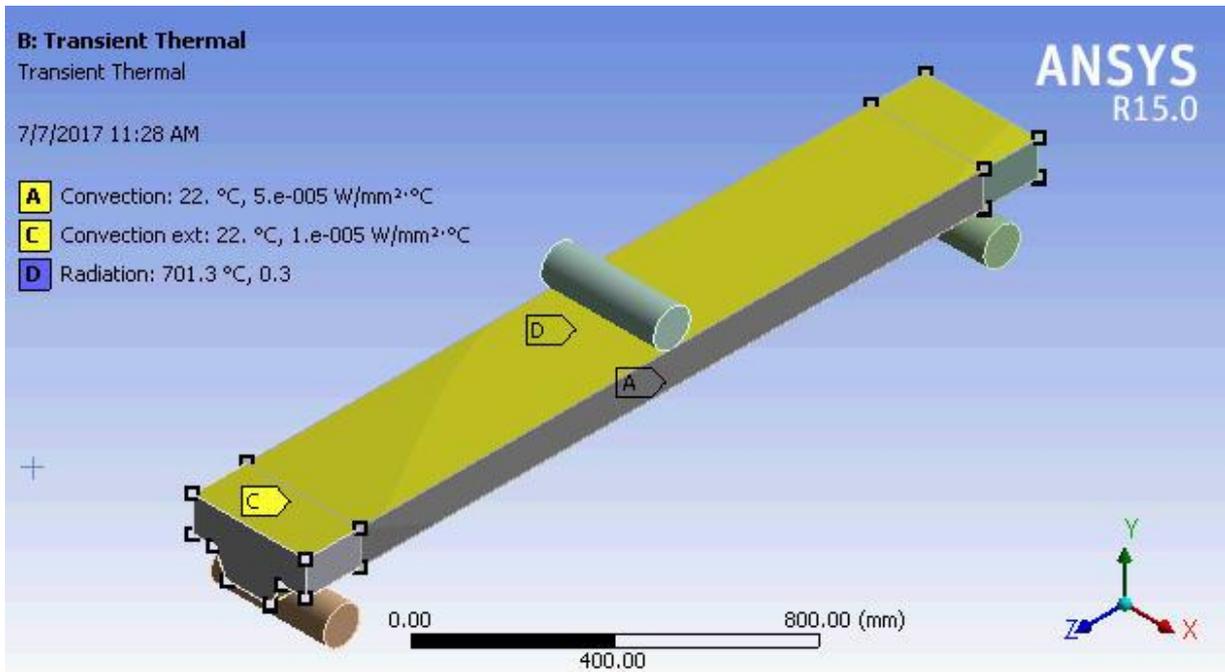


Figura 15. Cargas térmicas aplicadas al modelo.

Análisis estructural

En este apartado se utilizaron los resultados de desplazamiento de las losas producido por la acción del fuego y la carga aplicada obtenidos en los ensayos experimentales.

A continuación, se muestran las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno aplicadas para los posteriores cálculos:

Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales más influyentes en este análisis, son, según el valor que el software ANSYS asigna por defecto, los que se muestran a continuación:

- Módulo de Young acero = 200 GPa
- Módulo de Young hormigón = 30 GPa
- Carga última de rotura acero = 0
- Carga última de rotura hormigón = 41 Mpa

Se procedió a inmovilizar los apoyos y a añadir la carga calculada mediante normativa.

Condiciones de contorno

- Restricción del desplazamiento (nulo en las direcciones x, z) para los apoyos.
- Carga aplicada según lo indicado en la Norma, de valor diferente según el tipo de hormigón a estudiar.

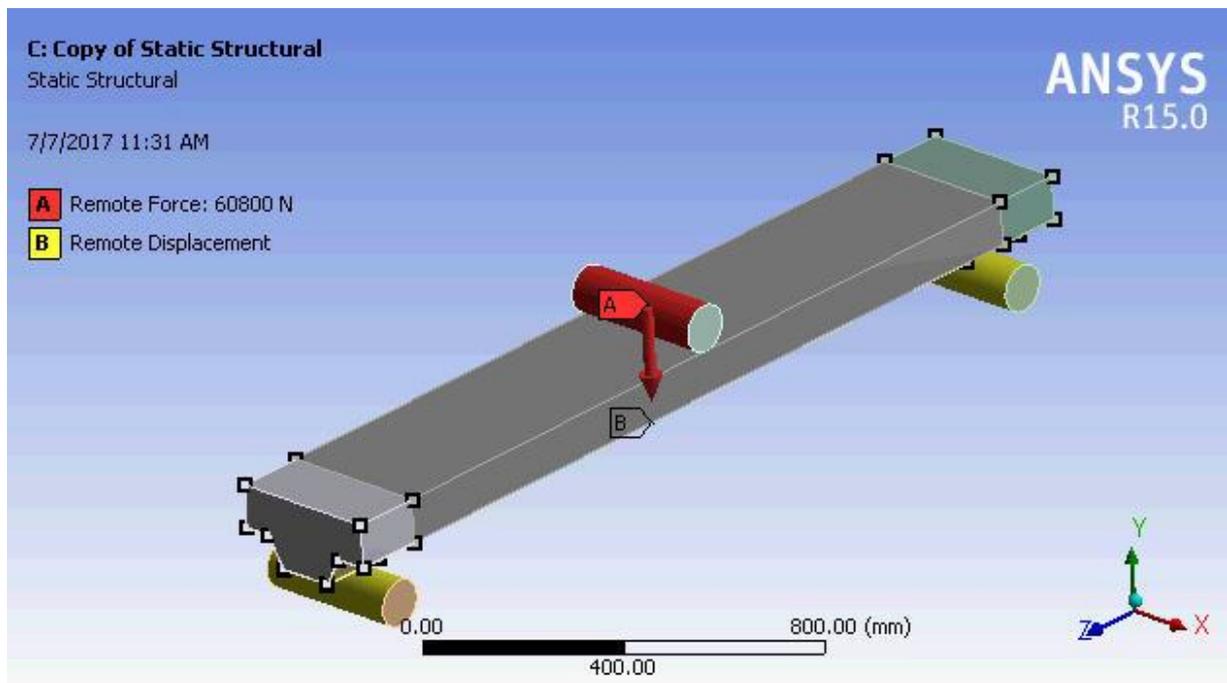


Figura 16. Cargas estructurales aplicadas al modelo.

2.4 Resultados obtenidos

ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones y del ensayo de resistencia a flexión utilizados en la fabricación de los forjados colaborantes son los que se indican en la siguiente tabla:

Tabla1. Propiedades de los hormigones

Tipo de hormigón	Densidad (kg/m ³)	Carga de rotura a flexión V_c (kN)	Carga de ensayo de resistencia al fuego [0,6· V_c (kN)]	Resistencia característica a compresión f_{ck} (MPa)	Módulo elástico (N/m ²)
HLE_LSDur-23	1875	50.47	30.28	25.60	2.07E+10
HLE_LSDur-28	1902	51.07	30.64	28.59	2.16E+10
HLE_LSDur-37	2010	58.37	35.02	30.22	2.72E+10
HN	2435	73.34	44	36.97	4.57E+10

A continuación, se muestran gráficamente los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al fuego realizados.

En todos estos ensayos, se cumplieron con las restricciones indicadas en la normativa respecto a las tolerancias y desviaciones máximas respecto a la curva de ensayo normalizada.

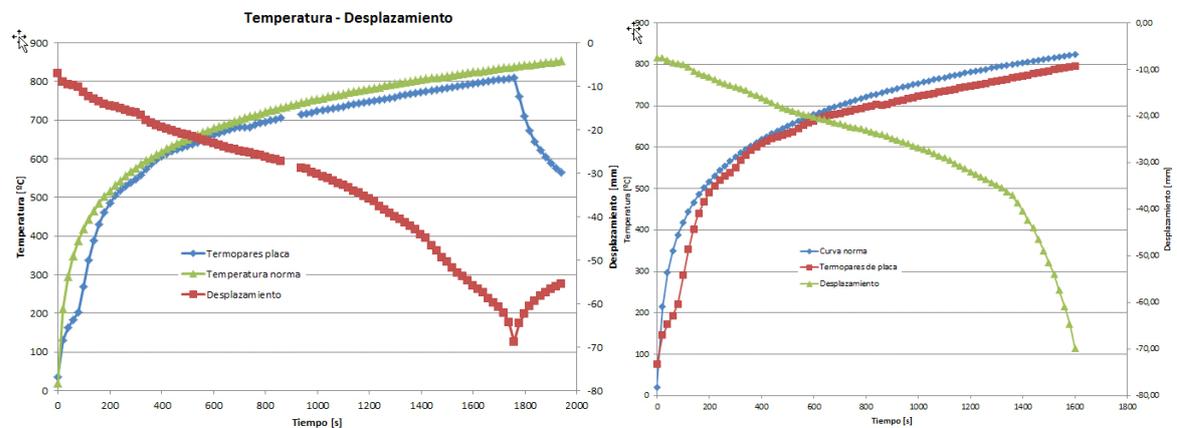


Figura 17. Resultados ensayo de resistencia al fuego HLE LSDur 23

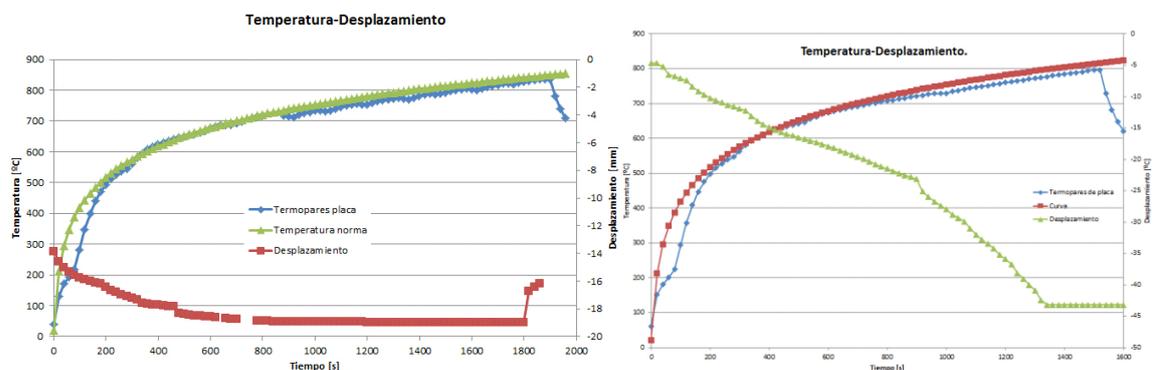


Figura 18. Resultados ensayo de resistencia al fuego HLE LSDur 28

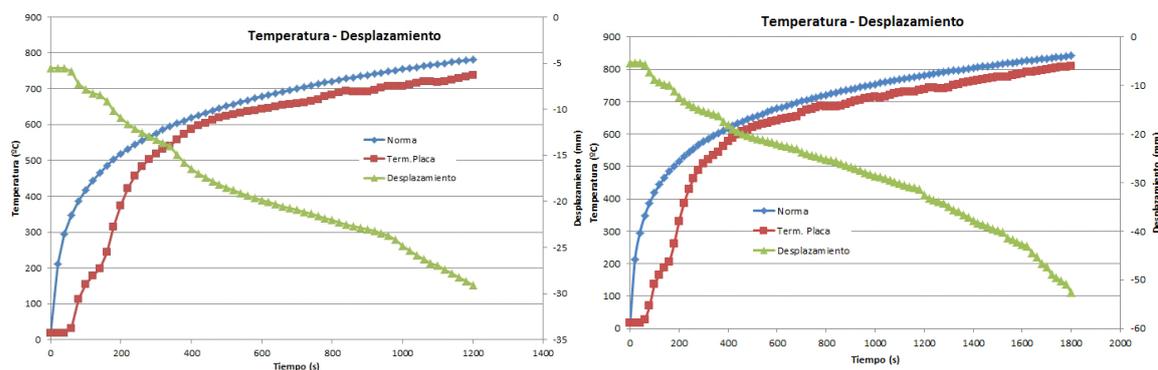


Figura 19. Resultados ensayo de resistencia al fuego HLE LSDur 37

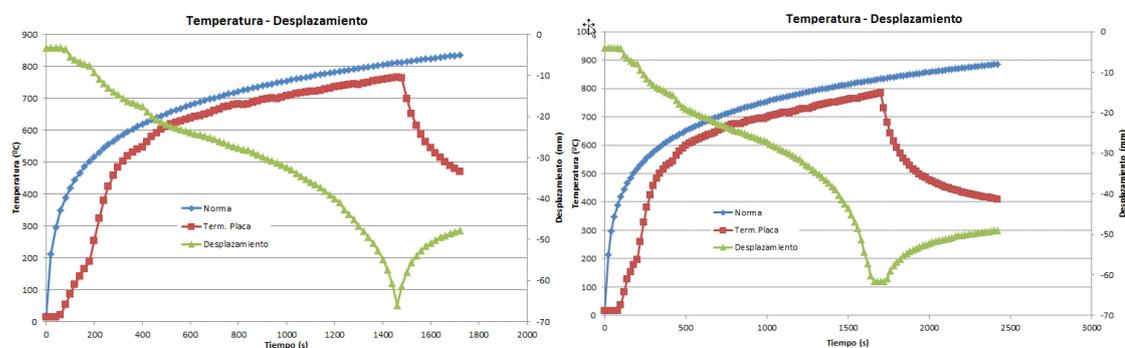


Figura 20. Resultados ensayo de resistencia al fuego HN

En la tabla 2 se indica un resumen de los resultados de resistencia al fuego obtenidos para estos elementos. Como se observa en dicha tabla, en todos los casos los ensayos realizados sobre este tipo de losa mixta se detuvieron al superarse la flecha máxima establecida en la normativa y antes de alcanzar el tiempo mínimo de resistencia al fuego.

Se puede observar también que el comportamiento bajo condiciones de fuego de los forjados mixtos fabricados con HLE es muy similar al que presentan los hormigones normales. Teniendo en cuenta los beneficios de los hormigones ligeros respecto a los hormigones normales en cuanto al ahorro energético y la disminución del peso muerto de la estructura, y a su similar comportamiento resistente al fuego, podemos concluir que los forjados colaborantes fabricados con este material son mucho más eficientes que los fabricados con hormigones tradicionales.

Tabla2. Resultados de los ensayos sobre forjados colaborantes

Tipo de hormigón	Razón de la finalización del ensayo	Tiempo (min)	Cumplimiento Normativa (30 min)
HLE-23	Flecha>60mm	25	NO
HLE-28	Flecha>60mm	26	NO
HLE-37	Flecha>60mm	27	NO
HN	Flecha>60mm	25	NO

Como conclusión final a los ensayos realizados, se puede observar en los resultados que, a pesar de no disponer de protección contra el fuego, como por ejemplo la habitual proyección con vermiculita, todos los forjados están cerca de cumplir con los 30 min de resistencia al fuego impuesto por el DB-SI del CTE.



Figura 21. Estado de la losa HLE LSDur-23 mk2 tras la realización del ensayo.



Figura 22.- Estado de losa HN-2 tras la finalización del ensayo.

MODELOS NUMÉRICOS

Las siguientes imágenes muestran el comportamiento de la losa ensayada bajo la acción del fuego transcurridos 30 minutos desde el inicio del ensayo. Téngase en cuenta que la temperatura en los extremos de la losa no aumenta debido a que solo está aplicando fuego entre los apoyos -Lexp- tal y como se puede observar en la figura 23. Se puede observar la influencia del espesor del hormigón con respecto al aumento de la temperatura en la losa.

Se llevó un registro de temperaturas a lo largo de ese tiempo con el fin de graficarlo y comparar los resultados con los obtenidos en los ensayos experimentales. En las figuras 24 y 25 se muestra una comparativa de algunos de los resultados obtenidos en el interior de la losa mediante el software de simulación numérica y las temperaturas registradas por los termopares durante los ensayos experimentales.

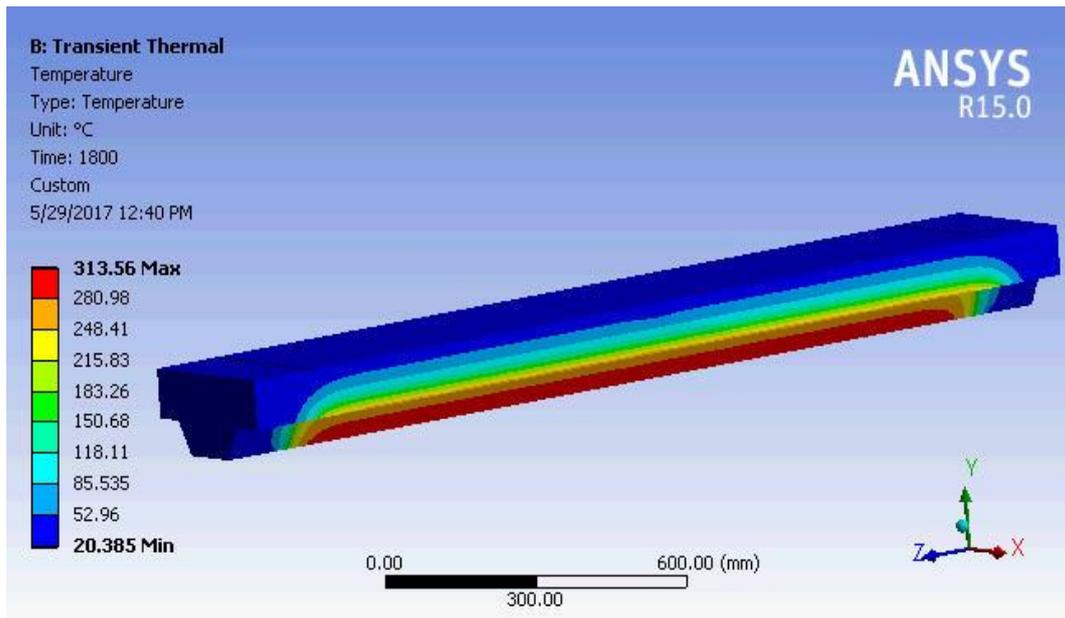


Figura 23.- Distribución de temperaturas tras simulación (Hormigón normal).

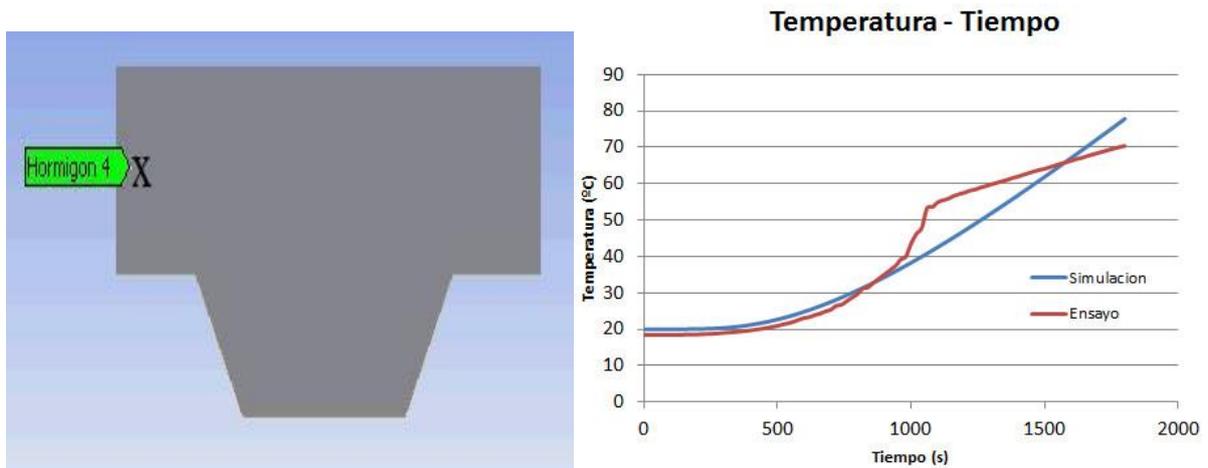


Figura 24.- Ubicación y gráfico temperatura-tiempo en el punto 4 para HLE LSDur-23.

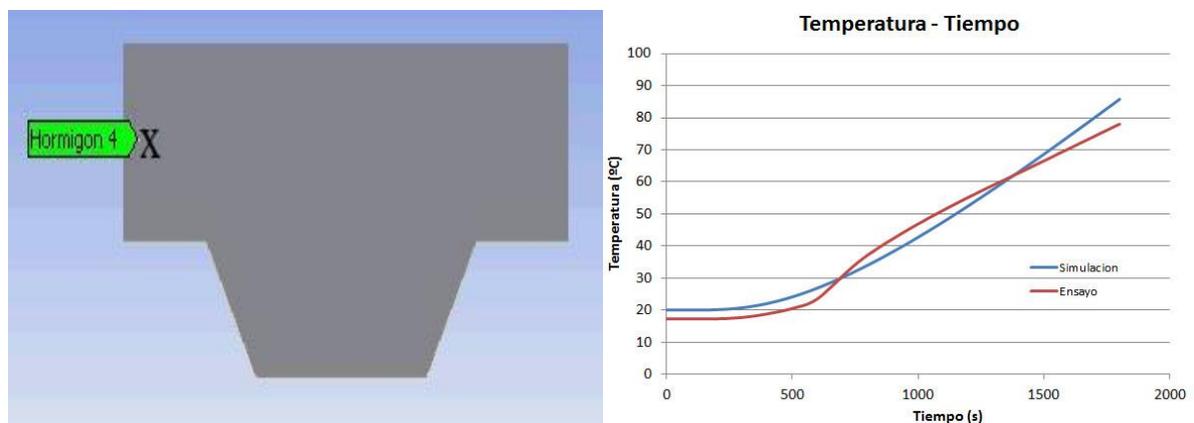


Figura 25.- Ubicación y gráfico temperatura-tiempo en el punto 4 para HN.

Los resultados arrojan un aumento de la temperatura en los diferentes puntos en el interior del hormigón debido al incremento de la conductividad térmica promovido por el aumento de la densidad del material.

La porosidad del material tiene una gran influencia sobre la conductividad térmica, de manera que el aumento de la fracción en volumen de poros conduce a una reducción de la conductividad térmica, en virtud de la muy baja conductividad térmica del aire (gas).

En la siguiente imagen (figura 26) se puede observar la deformación sufrida por la losa en un modelo acoplado térmico estructural, es decir, el desplazamiento vertical que experimenta una vez se ha aplicado la carga y el fuego (para un modelo de HN).

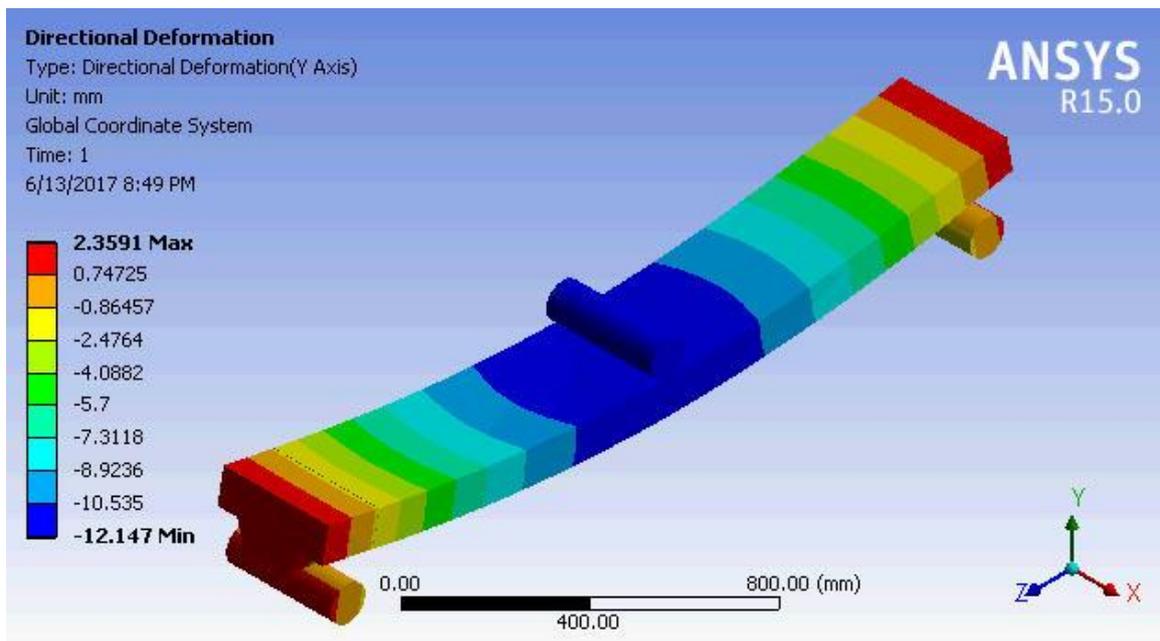


Figura 26.- Deformación de un modelo acoplado (Hormigón Normal)

A la vista los resultados numéricos obtenidos en los 4 diferentes tipos de hormigón, las deformaciones y temperaturas tras la finalización de los mismos son muy similares. El hormigón HLE LSDur-23 es el forjado que presenta una mayor resistencia al paso del flujo térmico debido a la baja conductividad térmica del material. Por consiguiente, este tipo de hormigón presenta la mínima temperatura en la cara no expuesta respecto a los demás tipos de hormigones, permitiendo en el caso de un posible incendio un mayor tiempo de respuesta del personal de un edificio para realizar la evacuación. Esto hace pensar que este tipo de forjado mixto sea tal vez el más adecuado para resistir al fuego de acuerdo a los experimentos y simulaciones numéricas realizadas.

No obstante, los resultados de los modelos numéricos muestran unos valores de desplazamiento menores que los alcanzados en los ensayos experimentales realizados en el horno. Esto se debe principalmente a la presencia de no linealidades geométricas, debidas a los contactos y al material, las cuales no se han tenido en cuenta en la realización del presente Proyecto de Investigación.

2.5 Trabajos o necesidades futuras

Tal y como se ha comentado en el apartado de resultados, los forjados estudiados no alcanzan los 30 minutos de resistencia al fuego establecidos en el CTE. Sin embargo, no se han empleado elementos de protección adicional contra el fuego como es el caso habitual de la vermiculita proyectada. Esto invita a la realización de futuros ensayos de resistencia al fuego, añadiendo este tipo de elemento en la fabricación de los forjados y evaluando su influencia en el comportamiento frente al fuego.

Otro trabajo a realizar será el desarrollo de modelos numéricos teniendo en cuenta la presencia de las no linealidades, de forma que permitan ajustar en mayor medida los resultados a los obtenidos experimentalmente.

También será necesario realizar un estudio paramétrico mediante el cual se pueden evaluar los parámetros más influyentes en el comportamiento a fuego de los forjados. Gracias a esta tarea se podrán cubrir todos los casos posibles que se puedan producir en la vida útil del elemento constructivo.

2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias...)

Divulgación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al fuego sobre los forjados ligeros colaborantes en la IV FIRE ENGINEERING CONFERENCE celebrada en Valencia durante el mes de diciembre de 2016 con la presentación del artículo "*ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA AL FUEGO DE FORJADOS COLABORANTES DE HORMIGÓN LIGERO ESTRUCTURAL CON FIBRAS POLIMÉRICAS*". En la presentación realizada, se ha citado expresamente al IUTA y al Ayuntamiento de Gijón, agradeciendo la financiación aportada a través del proyecto SV-16-GIJON-1-20.

También se presentó la ponencia "*FINITE ELEMENT ANALYSIS AND EXPERIMENTAL FIRE TEST OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE SLABS*" en el CONGRESS ON NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING - CMN 2017, celebrado en Valencia del 3 al 5 de julio del año 2017. En la publicación asociada a los artículos del congreso, se ha citado expresamente al IUTA y al Ayuntamiento de Gijón agradeciendo la financiación aportada a través del proyecto SV-16-GIJON-1-20.

Juan Enrique Martínez-Martínez, Mar Alonso-Martínez and Felipe Pedro Álvarez Rabanal. "Ensayos experimentales y análisis mediante elementos finitos sobre losas mixtas de hormigón ligero frente al fuego". Book of Abstracts, Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería CMN2017, pp.1781-1790, Valencia, 2017 (ISBN: 978-84-947311-0-5).

3. MEMORIA ECONÓMICA

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-16-GIJÓN-1-20.	2.000			
Otras fuentes	Referencia proyecto/contrato	BIA-2012-31609			
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	Darío Montes Nava			
	Tareas	Investigación y realización de ensayos en laboratorio sobre forjados colaborantes			
	Período	Octubre 2016 a Diciembre 2016 (3 meses)			

4. OTROS PROYECTOS Y CONTRATOS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

Título del proyecto/contrato	
Referencia	
Investigador/a/es principal/es	
Equipo investigador	
Periodo de vigencia	
Entidad financiadora	
Cantidad subvencionada	