

Análisis de la resistencia al fuego de un forjado de viguetas de madera y revoltones sometido a la curva de fuego normalizada

*Analysis of the fire resistance of a timber jack arch floor submitted to the standard fire curve***

Ester García-Castillo^{*,a}, Ignacio Payá-Zaforteza^b y Antonio Hospitaler-Pérez^c

^a Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Investigadora predoctoral. ICITECH. Universitat Politècnica de València. Email: esgarcas@cam.upv.es

^b Catedrático de Universidad. ICITECH. Universitat Politècnica de València. Email: igpaza@upvnet.upv.es

^c Catedrático de Universidad. ICITECH. Universitat Politècnica de València. Email: ahospitaler@cst.upv.es

RESUMEN

El objeto de esta comunicación es el de analizar la resistencia al fuego de un forjado de viguetas de madera y revoltones de ladrillo típicos de los edificios históricos, sometido a la curva de fuego normalizada. Dadas las particularidades geométricas y constructivas de esta tipología, no es posible la aplicación directa de los métodos establecidos por la UNE-EN 1991-1-2, por tanto, el análisis realizado combina modelos numéricos y métodos mecánicos simplificados. Los resultados muestran que los edificios históricos no siempre satisfacen los requisitos exigidos por la normativa vigente y, en consecuencia, resulta esencial realizar estos análisis para garantizar su seguridad en caso de incendio.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyse the fire resistance of a Spanish timber jack arch floor, typical of historical buildings, submitted to the standard fire curve. Given the geometric and constructive peculiarities of this typology, it is not possible to directly apply the methods established by UNE-EN 1991-1-2, therefore, the analysis performed combines numerical models and simplified mechanical methods. The results show that historical buildings do not always meet the requirements set by current regulations and, consequently, it is essential to perform these analyses in order to ensure their safety in case of fire.

PALABRAS CLAVE: curva de fuego normalizada, forjado de madera, revoltones, SAFIR, rehabilitación.

KEYWORDS: standard fire curve, timber flooring system, small vaults, SAFIR, rehabilitation.

1. Introducción

La rehabilitación de los centros históricos supone una gran oportunidad para preservar el patrimonio cultural y adecuar edificios de forma sostenible. No obstante, con ello surge un gran reto, adaptar a los requisitos de las normativas actuales edificios que se construyeron mucho antes de que estas entraran en vigor, entre ellos, el de la resistencia al fuego de la estructura. El

cumplimiento de este requisito en edificios históricos resulta especialmente delicado, pues, en general, no se tuvo en cuenta en el momento de construcción de los mismos.

Los edificios históricos suelen tener una estructura vertical con muros de mampostería o de fábrica de ladrillos y forjados con viguetas de madera. Dentro de este contexto, el propósito

principal de este artículo es el de analizar el comportamiento frente al fuego de forjados tradicionales de edificios con valor histórico. En concreto, el análisis se centra en un forjado típico valenciano construido en el siglo XVIII en la región de Valencia formado por revoltones de ladrillos rejuntados con yeso que apoyan sobre viguetas de madera.

Esta tipología es la más extendida en los edificios históricos de la región de Valencia [1] debido a su facilidad constructiva, pues no precisa de cimbra, y al ahorro de madera en comparación con otras tipologías de forjado tradicional [2].

Tal y como se observa en la Figura 1, este sistema estructural consiste en una serie de bovedillas de ladrillos de luz igual a la distancia entre dos viguetas consecutivas. Sobre las bovedillas o revoltones se dispone el relleno que tiene como fin el de crear una superficie plana que sirva de apoyo para el solado.

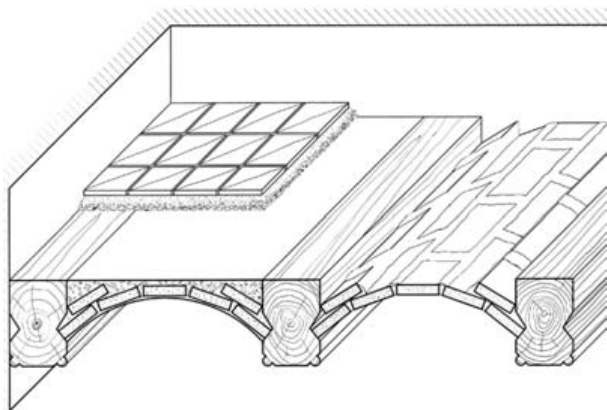


Figura 1. Axonometría de un forjado tradicional de viguetas de madera y revoltones de ladrillos. Fuente: [2].

Existen diferentes variantes de vigueta de madera para esta tipología de forjado tradicional. Entre las más comunes se encuentran las viguetas de una única pieza con muescas sobre las cuales apoyan las bovedillas y las formadas por alma central y dos listones laterales clavados a esta. La segunda solución permite el ahorro de material frente a la primera, no obstante, no se volvió popular hasta que la producción de clavos fue industrial.

Dadas las particularidades geométricas y la organización constructiva de esta tipología de forjados, no es posible la aplicación directa de los métodos establecidos por la normativa, en concreto, la UNE-EN 1995-1-2 [3], para la verificación de la resistencia al fuego de estos elementos estructurales. Es por ello, que

muchos de estos forjados han sido demolidos con el fin de sustituirlos por otros de nueva planta, o bien, han sido protegidos frente al fuego con elementos extraños que le han hecho perder su elevado valor estético.

El análisis llevado a cabo en este artículo permite la verificación frente al fuego de estos forjados tradicionales de acuerdo con la normativa vigente, y evita la necesidad de protegerlos frente al fuego, en caso de satisfacer los requisitos establecidos por esta.

Con ello, se pretende, por un lado, contribuir a la conservación del patrimonio tratando de preservar la arquitectura y estética singular de los forjados de viguetas de madera y revoltones de ladrillos y, por otro lado, favorecer una construcción más sostenible a través del análisis de resistencia al fuego de los mismos.

2. Caso de estudio

El forjado de viguetas de madera y revoltones de ladrillos escogido para el análisis pertenece a un edificio de viviendas de cuatro plantas habitables ubicado en el centro histórico de la ciudad de Valencia. La Figura 2 muestra la geometría del forjado objeto de estudio. En esta se aprecia como el tipo de vigueta de madera es la formada por alma central y listones laterales clavados a la misma.

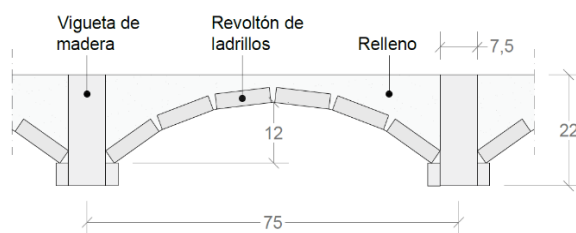


Figura 2. Sección transversal del forjado estudiado.

En cuanto a los materiales que lo conforman, se trata de viguetas de madera de coníferas, las cuales sirven de apoyo para los revoltones de ladrillos. En concreto, la madera pertenece al grupo de especie “nigra-sylvestris” al cual pertenecen las especies de pino laricio, pino silvestre y pino de montaña. Sobre las bovedillas se encuentra el relleno que, en este caso, se trata de un mortero de cal hidráulica.

Con el fin de que el análisis sea lo más representativo posible, se ha escogido estudiar tres recintos distintos del edificio en los cuales podría ocurrir el incendio y cuyas dimensiones

son típicas de los distintos compartimentos de una vivienda. El recinto 1 de 7 m² y con una luz de forjado de 2,80 m estaría asociado a un dormitorio pequeño; el recinto 2 de 16 m² y una luz de 4 m a un dormitorio doble y, por último, el recinto 3 de 25 m² y una luz de 5 m a un salón comedor.

3. Exigencias básicas de seguridad a satisfacer

Dado que el edificio de viviendas objeto de estudio se encuentra en España, el marco normativo en vigor que regula la edificación es el CTE - Código Técnico de la Edificación [4]. En este se establecen las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.

El CTE [4] se divide en dos partes, en la primera se establecen las exigencias básicas, las cuales son de obligado cumplimiento tanto para edificios de nueva planta como para intervenciones en edificios existentes, y la segunda parte, formada por los documentos básicos, consiste en la aplicación práctica de dichas exigencias.

En este caso, las exigencias básicas de seguridad a satisfacer en caso de incendio son las dispuestas en el Documento Básico de Seguridad en caso de incendio (DB-SI) del CTE [4]. Para satisfacer dicho requisito básico, el DB-SI establece seis exigencias básicas. En este caso, el análisis se ha centrado en la exigencia básica SI 6 correspondiente a Resistencia al fuego de la estructura.

Para dicha exigencia, el DB-SI (sección SI 6) establece que un elemento tendrá suficiente resistencia al fuego si, durante una duración determinada del incendio, el valor de cálculo del efecto de las acciones, en todo instante de tiempo t , no supera el valor de la resistencia de dicho elemento. Esta duración de resistencia al fuego a satisfacer viene fijada en la Tabla 3.1 del DB-SI del CTE [4] en función del tipo de uso del edificio o recinto en que ocurre el incendio y de la altura de evacuación más desfavorable del edificio.

Para edificios de viviendas cuya altura de evacuación sea inferior a 15 metros, se exige un tiempo de resistencia al fuego de 60 minutos. Para alturas de evacuación entre 15 y 28 metros, el tiempo a satisfacer es de 90 minutos. No

tienen sentido alturas de evacuación superiores a 28 metros por carecer de sentido en la tipología constructiva analizada. En este caso, aunque el edificio objeto de estudio presenta una altura de evacuación inferior a 15 metros, asociada a un tiempo de resistencia al fuego exigido de 60 minutos, se mostrarán también los resultados obtenidos para un tiempo de exposición al fuego de 90 minutos.

4. Metodología

Siguiendo el procedimiento establecido por la UNE-EN 1991-1-2 [5], para el análisis de la resistencia al fuego del forjado estudiado, en primer lugar, debe seleccionarse el modelo de incendio a considerar en el análisis térmico. En este caso, se ha asumido la curva normalizada tiempo-temperatura, la cual se describe en el apartado 4.1 de este artículo.

Por otro lado, deben seleccionarse los escenarios de fuego donde ocurre el incendio. En este caso, las características del recinto no van a influir en el análisis térmico, pues se ha escogido un modelo de fuego que solo depende del tiempo de exposición. No obstante, el tamaño del mismo será determinante en el análisis mecánico al contemplar distintas luces de forjado. Tal y como se indica en el apartado 2, los valores de luz de forjado considerados son 2,8, 4 y 5 metros, los cuales se encuentran dentro del rango habitual en forjados de edificación.

Seguidamente, se realiza el análisis térmico para obtener la evolución de la temperatura en el interior del forjado en función del tiempo. Para ello, se ha elaborado un modelo avanzado de transferencia de calor mediante un software de elementos finitos. El análisis térmico llevado a cabo se describe en profundidad en el apartado 4.2 de este artículo.

Finalmente, con el propósito de obtener el tiempo de resistencia al fuego del forjado se elabora un cálculo mecánico seccional basado en los métodos mecánicos simplificados de la UNE-EN 1995-1-2 [3] para la verificación de la resistencia mecánica de la madera en situación de incendio. El análisis mecánico se realiza considerando distintos valores de luz de forjado. La metodología seguida para el análisis mecánico del forjado tradicional estudiado se describe en detalle en el apartado 4.3 de este artículo.

4.1 Modelo de incendio

El modelo de incendio asumido en el análisis es el definido por la curva normalizada tiempo-temperatura que se recoge en la UNE-EN 1991-1-2 [5]. La curva representa la evolución de la temperatura del gas circundante a la superficie del elemento estructural en función del tiempo y queda definida por la expresión (1).

$$\Theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

Donde Θ_g ($^{\circ}\text{C}$) representa la temperatura del gas en el recinto donde ocurre el incendio y t (min) es el tiempo de exposición al fuego.

Es importante señalar que esta curva no es representativa de ningún incendio real, ya que es monótonicamente creciente, sin presentar fase decreciente ni extinción. Además, presenta otro inconveniente pues no depende de parámetros físicos propios del recinto en que ocurre el incendio tales como la carga de fuego; las condiciones de ventilación; el tamaño del recinto; o las propiedades térmicas de los materiales que lo revisten.

No obstante, la curva normalizada es comúnmente empleada como sistema de referencia internacional con el fin de realizar comparaciones entre diferentes elementos constructivos.

4.2 Análisis térmico

El análisis térmico se ha llevado a cabo mediante el software de cálculo SAFIR (v. 2019.a.2), desarrollado por J. M. Franssen y T. Gernay en la University of Liège. Este software se emplea para modelar el comportamiento de las estructuras frente al fuego y aplica el método de los elementos finitos para realizar los cálculos.

Dado que SAFIR ha sido desarrollado con el lenguaje de programación FORTRAN, para generar los modelos de forma sencilla puede emplearse el preprocesador GiD. Del mismo modo, tras procesar el cálculo en SAFIR, los resultados pueden visualizarse de manera más intuitiva en los postprocesadores GiD o Diamond. Este último ha sido creado por los desarrolladores de SAFIR.

En este caso, se ha realizado un análisis térmico bidimensional. Para ello, en GiD se define la geometría y se asigna a cada elemento

estructural su material correspondiente, así como las propiedades térmicas del mismo. Seguidamente, se fijan las condiciones de contorno. En este caso, en la cara expuesta del forjado se impone la curva normalizada y en la no expuesta se asigna la temperatura ambiente de 20°C .

Por último, se genera el mallado del modelo, discretizando cada elemento de la sección transversal en un determinado número de elementos finitos. Cuando GiD genera la malla de elementos finitos, automáticamente, la información del modelo se transfiere a los elementos de la malla. Dado que se ha realizado un análisis bidimensional, los elementos finitos son de tipo superficie. Debido a la forma más irregular del relleno, se han empleado elementos finitos triangulares al generar el mallado, mientras que para la discretización de la vigueta y los ladrillos se han utilizado elementos cuadriláteros. Se ha evitado el uso de elementos cóncavos en el mallado, ya que estos no aportan resultados fiables. En los nodos de los elementos se obtiene la solución exacta, mientras que, la solución aproximada para el resto de los puntos, se obtiene por interpolación lineal a partir de los resultados obtenidos en los nodos.

Cabe destacar que, la solución obtenida de SAFIR tiende a la solución real cuando el tamaño de los elementos finitos tiende a cero, no obstante, aumentar el número de nodos y elementos, incrementa el coste computacional requerido por el software para realizar los cálculos. Teniendo esto en cuenta, se ha realizado un análisis de sensibilidad del mallado considerado de forma que se tenga un coste computacional razonable, sin comprometer la precisión de los resultados.

El análisis térmico a realizar por SAFIR es transitorio, basado en un cálculo no lineal.

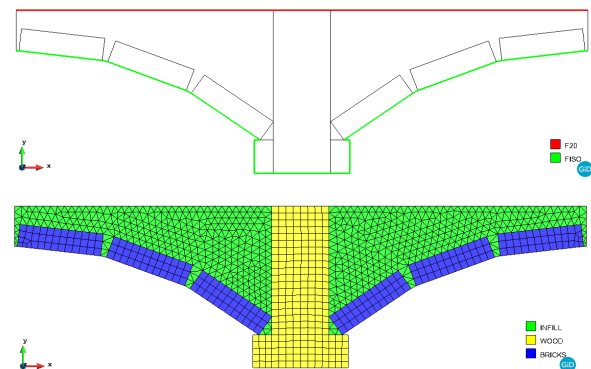


Figura 3. Condiciones de contorno, materiales y malla generada para el modelo en SAFIR.

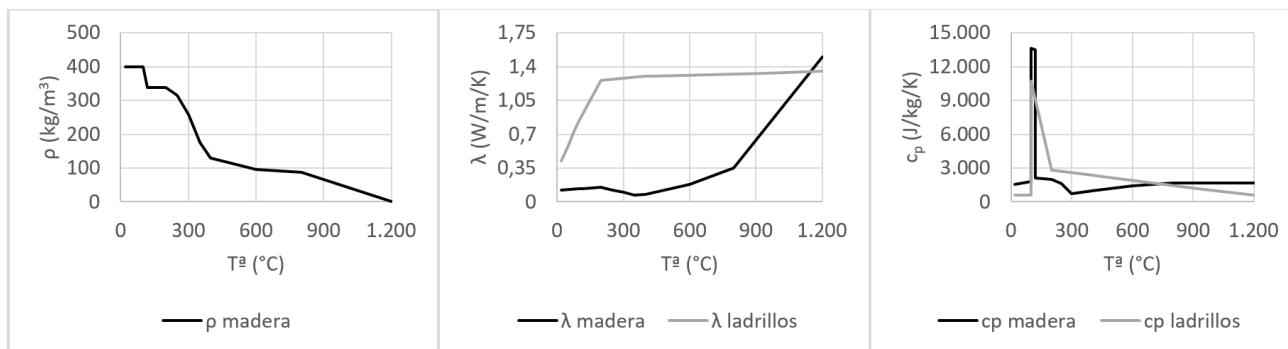


Figura 4. Propiedades térmicas de la madera y los ladrillos.

Dado que la curva normalizada considera que la temperatura se distribuye uniformemente en todo el recinto, todos los elementos estructurales del mismo tipo estarán afectados uniformemente por el incendio, pues no se trata de un incendio localizado. Es por ello que, resulta suficiente con modelizar y determinar el campo de temperaturas para un único elemento de cada tipo, delimitado por los ejes/bordes adiabáticos en los que no existe intercambio de calor. Consecuentemente, tal y como se aprecia en la Figura 3, se ha modelizado una única vigueta con la anchura tributaria que corresponde de relleno y revoltones de ladrillos.

Las propiedades térmicas de los materiales del forjado que se deben introducir en el modelo térmico son la densidad (ρ), la conductividad térmica (λ) y el calor específico (c_p). Los valores de estas propiedades se han obtenido de acuerdo con la normativa vigente.

En primer lugar, la madera de las viguetas del forjado objeto de estudio procede de árboles de coníferas y presenta una densidad igual a 400 kg/m^3 a temperatura ambiente (20°C). La madera de los árboles de coníferas es más ligera y porosa que otros tipos de madera tales como maderas frondosas tipo roble, por ejemplo. Es por ello, que la madera de coníferas arderá más rápido dado que los gases se liberan con mayor rapidez y la velocidad de propagación es mayor.

En cuanto a la humedad de la madera, parámetro del cual dependen las propiedades térmicas de la misma, el rango usual de valores de humedad para madera secada al ambiente es entre el 16 y 18% [6]. En este caso, el valor de humedad asumido es del 18% y la temperatura ambiente inicial en el recinto se considera igual a 20°C . Con estos parámetros, las propiedades térmicas de la madera en función de la temperatura se obtienen según el Anexo B de la UNE-EN 1995-1-2 [3].

Por otro lado, se asume que los ladrillos

macizos presentan una densidad de 1.800 kg/m^3 . Debido a la naturaleza del material, a diferencia de la madera, el valor de su densidad permanece prácticamente constante a lo largo de todo el incendio. El resto de las propiedades térmicas de los ladrillos en función de la temperatura se obtienen de acuerdo con el Anexo D de la UNE-EN 1996-1-2 [7].

Las propiedades térmicas consideradas para la madera y los ladrillos, en función de la temperatura, son las que se muestran en la Figura 4.

Por último, las propiedades térmicas del relleno del forjado se han tomado del “Catálogo de Elementos Constructivos” del CTE [4]. En este caso, el catálogo recomienda que, para morteros de cal colocados “in situ”, se considere una densidad de 1.900 kg/m^3 . A dicha densidad le corresponde una conductividad térmica de $1,30 \text{ W/m/K}$ y un calor específico de 1.000 J/kg/K .

Cabe destacar que, en el modelo térmico elaborado en SAFIR, se consideran los tres mecanismos de transmisión de calor: por conducción, por radiación y por convección. El flujo de calor incidente sobre la estructura transmite el calor a la misma por convección y radiación, mientras que la conducción de calor se produce por el contacto directo entre los diferentes elementos constructivos del forjado, así como en el interior del propio elemento.

En el caso de la radiación, la UNE-EN 1991-1-2 [5] propone emplear un coeficiente de emisividad (ϵ) igual a 0,8. En cuanto a la convección, para una exposición a la curva normalizada tiempo-temperatura, de acuerdo con la UNE-EN 1991-1-2 [5], el coeficiente de transferencia de calor por convección (α_c) a emplear es $25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.3 Análisis mecánico semianalítico

Tanto el análisis mecánico como el térmico se han centrado en las viguetas de madera, pues es el elemento más vulnerable frente al fuego.

Para el cálculo de la resistencia mecánica de elementos de madera sometidos a fuego, la UNE-EN 1995-1-2 [3] propone dos métodos simplificados, el “Método de la sección reducida” y el “Método de las propiedades reducidas”.

Ambos métodos se basan en el concepto de profundidad carbonizada, la cual define la UNE-EN 1995-1-2 [3] como la línea que separa la capa carbonizada del resto de sección de madera. Dicha norma establece que la línea de profundidad carbonizada se asocia con la posición de la isoterma 300.

La UNE-EN 1995-1-2 [3] propone unas ecuaciones para el cálculo de la profundidad carbonizada. No obstante, dada la singularidad geométrica de las viguetas, así como las condiciones de contorno de las mismas al estar rodeadas, en parte, por el relleno del forjado, dichas ecuaciones no resultan de aplicación directa. Es por ello que, se asumirá como profundidad carbonizada a la isoterma 300, en función del tiempo de exposición a la curva normalizada, obtenida del modelo térmico de elementos finitos elaborado en SAFIR.

De entre los dos métodos, la UNE-EN 1995-1-2 [3] recomienda usar el procedimiento del “Método de la sección reducida”, por tanto, este ha sido escogido para el análisis mecánico del forjado tradicional.

El “Método de la sección reducida” propone emplear una sección residual para el cálculo mecánico resultado de reducir a la sección inicial la profundidad carbonizada ($d_{char,n}$) más un espesor adicional de valor $k_0 \cdot d_0$, que para tiempos de exposición al fuego superiores a 20 minutos, el resultado del producto es igual al valor máximo establecido de 7 mm.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (2)$$

En este caso, tal y como se ha justificado anteriormente, $d_{char,n}$ se asumirá como la isoterma 300 obtenida en SAFIR en función del tiempo de exposición al fuego. Por otro lado, cabe destacar que el producto $k_0 \cdot d_0$ representa una parte del espesor de la zona de pirólisis, donde las propiedades de resistencia y rigidez no se consideran nulas, al contrario de lo que ocurre

para la capa carbonizada, no obstante, sí son propiedades reducidas respecto a los valores que se tienen para la zona de madera intacta, pues las propiedades se ven afectadas debido a las altas temperaturas.

En resumen, las propiedades de resistencia y rigidez de la madera empiezan a reducirse desde los 20°C y son prácticamente nulas al alcanzar los 300°C. No obstante, tras la zona de pirólisis, la madera se encuentra intacta con sus valores de resistencia y rigidez originales. En la Figura 5 se muestran gráficamente los conceptos de capa carbonizada y zona de pirólisis en una viga de madera que ha estado sometida a fuego.

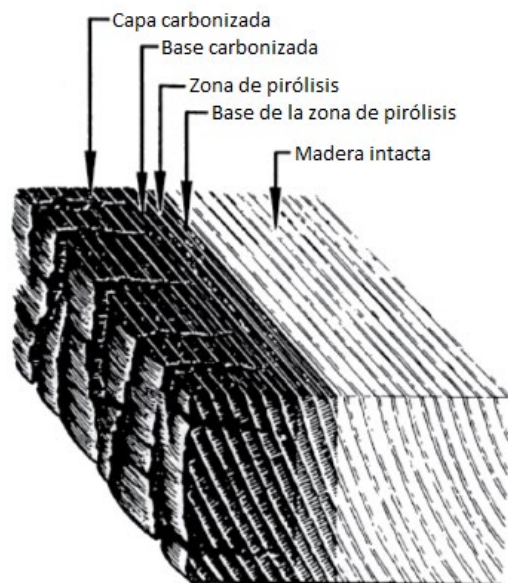


Figura 5. Capa carbonizada y zona de pirólisis en una viga de madera. Fuente: [8].

Por otro lado, en el caso del “Método de la sección reducida”, los valores de cálculo de las propiedades de resistencia y rigidez de la sección eficaz de la sección residual se calculan con un valor de $k_{mod,fi}$ igual a la unidad, es decir, no se minoran como es el caso del “Método de las propiedades reducidas”.

Dado que se desconocen las propiedades de resistencia y rigidez de las viguetas de madera del forjado objeto de estudio, se ha recurrido a la norma UNI 11119 [9]. Esta norma se emplea para la evaluación de estructuras existentes de madera y permite, mediante una clasificación visual y diagnóstico in situ basado en el uso de técnicas y ensayos no destructivos, asignar las propiedades mecánicas del elemento estructural de madera.

En base a dicha norma, para el tipo de especie de madera que presentan las viguetas y

para una categoría in situ I de la madera, se le asigna un valor de resistencia característica a flexión de 12 MPa y un módulo de elasticidad a flexión de 13.000 MPa. Probablemente, para una madera en buen estado, la resistencia característica real tenga un valor superior, pero a falta de ensayos mecánicos y/o más información, no es posible garantizarlo.

Conocido el procedimiento de cálculo mecánico, así como los valores para las propiedades de resistencia y rigidez de la madera de las viguetas, se realiza un cálculo seccional para obtener, en función del tiempo de exposición a la curva normalizada, la máxima carga (q_{max}) que el forjado puede resistir. Esta carga máxima se ha obtenido en función de los distintos valores de luz libre de forjado presentes en el edificio considerado para el caso de estudio. Para cada instante de tiempo t , el cálculo seccional se realiza con la sección residual correspondiente, según el “Método de la sección reducida”, aplicando las profundidades carbonizadas obtenidas en SAFIR.

En cuanto a las cargas consideradas en el cálculo seccional son el peso propio del forjado, las cargas muertas de tabiquería y pavimento y la sobrecarga de uso. A excepción del peso propio, los valores considerados para estas cargas son los recomendados por el DB-SE-AE del CTE [4].

En la Tabla 1 se muestran los valores de todas las cargas consideradas. Cabe señalar que las cargas de la Tabla 1 son superficiales, multiplicando estas cargas por el intereje del forjado se obtiene la carga lineal que actúa sobre una vigueta.

Tabla 1. Cargas consideradas en el cálculo seccional del forjado estudiado.

Carga	Valor (kN/m ²)
Peso propio del forjado	1,73
Pavimento	1,00
Tabiquería	1,00
Sobrecarga de uso	2,00

De acuerdo con la UNE-EN 1990 [10], para una situación de proyecto accidental, tal y como es un incendio, en la que solo existe una única carga variable, las acciones deben combinarse según la expresión (3):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} \quad (3)$$

Donde $\sum_{j \geq 1} G_{k,j}$ es el valor característico de las acciones permanentes y $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ el valor cuasipermanente de la carga variable. El valor recomendado para el coeficiente de simultaneidad ($\psi_{2,1}$) es 0,3 y se obtiene de la tabla A.1.1 de la UNE-EN 1990 para sobrecargas en edificios de categoría de uso A asociados a zonas residenciales.

Con todo ello, se ha obtenido, como resultado de la combinación de acciones para la situación de proyecto accidental, una carga lineal sobre la vigueta de valor 3,25 kN/m.

5. Resultados y discusión

En este apartado se exponen los resultados tras realizar los análisis térmicos y mecánicos descritos en el apartado anterior.

En primer lugar, se muestran los resultados del análisis térmico realizado en SAFIR. En la Figura 6 se presentan los campos de temperatura obtenidos sobre la sección transversal del forjado para unos tiempos de exposición a la curva normalizada de 30, 60 y 90 minutos, respectivamente.

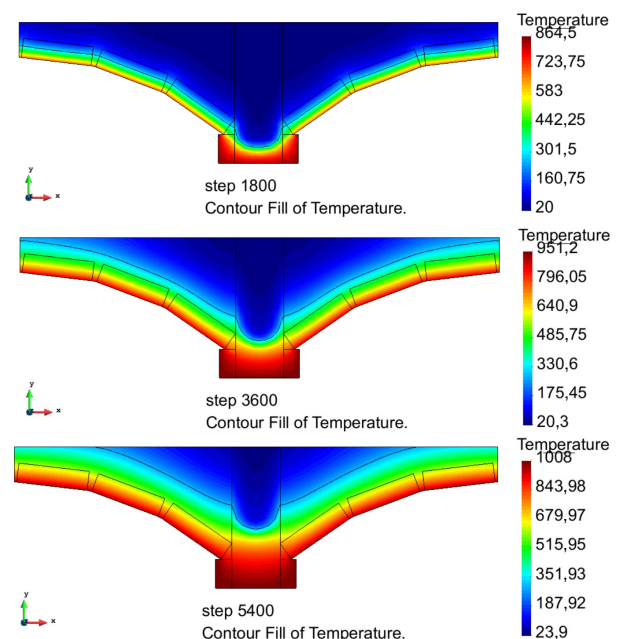


Figura 6. Campos de temperatura sobre la sección transversal del forjado para los tiempos de exposición a la curva normalizada de 30, 60 y 90 minutos.

Se representa, además, en la Figura 6, para cada uno de los instantes de tiempo mostrados, la posición de la isoterma 300, la cual se asocia con la profundidad carbonizada de la madera. Cabe señalar que, para la aplicación del “Método

de la sección reducida”, método mecánico simplificado que se ha considerado en el análisis mecánico del forjado tradicional, dicha profundidad carbonizada debe incrementarse en un valor $k_0 \cdot d_0$ definido anteriormente.

En cuanto al análisis mecánico, las propiedades mecánicas de la sección residual definida a partir del análisis térmico en función del tiempo de exposición al fuego se obtienen a través del software AutoCAD. Con ello, se realiza un cálculo seccional y se obtiene la carga máxima (q_{max}) que puede resistir el forjado en cada instante de tiempo de exposición a la curva normalizada considerando la sección residual de la vigueta de madera asociada a cada instante.

La Figura 7 resume los resultados del análisis mecánico realizado para el forjado. El grado de cumplimiento de la normativa, que, en este caso, exige un tiempo de resistencia al fuego de 60 minutos, se muestra en forma de factor de seguridad (FS) para los distintos valores de luz de forjado asumidos y en función del tiempo de exposición a la curva normalizada.

En este caso, el factor de seguridad empleado representa la relación entre la máxima carga (q_{max}) que puede resistir la vigueta de madera del forjado en función de la sección residual de la que dispone y la carga a la que puede estar sometida la vigueta (q_d) obtenida como resultado de la combinación de acciones para la situación de proyecto accidental. Valores del factor de seguridad iguales o superiores a la unidad implican el cumplimiento de los requisitos de la normativa en relación con el

tiempo de resistencia al fuego del elemento estructural.

Se aprecia en la Figura 7 cómo es el forjado de menor luz el único que satisface las exigencias de la normativa al superar los 60 minutos de resistencia al fuego. En el caso del forjado de 4 m de luz se alcanzaría una resistencia al fuego de unos 23 minutos, aunque esta no es suficiente para satisfacer los requisitos de la normativa. Por último, para el forjado de mayor luz apenas se obtiene un tiempo de resistencia al fuego de 1 minuto al considerar una exposición de este a la curva normalizada.

Cabe señalar que, si la madera del forjado estudiado se encontrara en peor estado de conservación, le podría corresponder, según la UNI 11119 [9], una categoría in situ II o III, cuyas resistencias características a flexión son 10 y 8 MPa, respectivamente. Se ha comprobado que, asumiendo dichos valores, el forjado no cumpliría las exigencias en ningún caso.

Por otro lado, tal y como se describe en el apartado 4.3, el método mecánico simplificado para madera en situación de incendio de la UNE-EN 1995-1-2 [3] que se ha empleado en este caso está basado en el concepto de profundidad carbonizada, la cual se asocia a la isoterma 300. La UNE-EN 1995-1-2 [3] propone, en el apartado 3.4.2, unas expresiones para obtener la profundidad carbonizada, en función del tiempo de exposición, en superficies de madera sin proteger. Se ha querido comparar la profundidad carbonizada obtenida a través de dichas expresiones con la que se obtiene de la

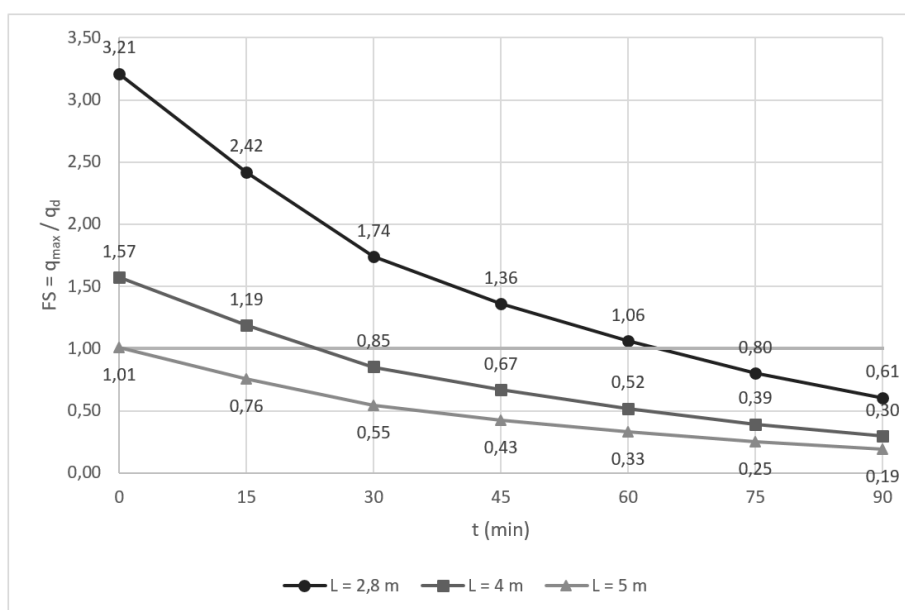


Figura 7. Factores de seguridad del forjado tradicional analizado en función del tiempo de exposición al fuego y para los distintos valores de luz considerados.

isoterma 300 en SAFIR. Ambas son directamente comparables pues se basan en una exposición a la curva normalizada.

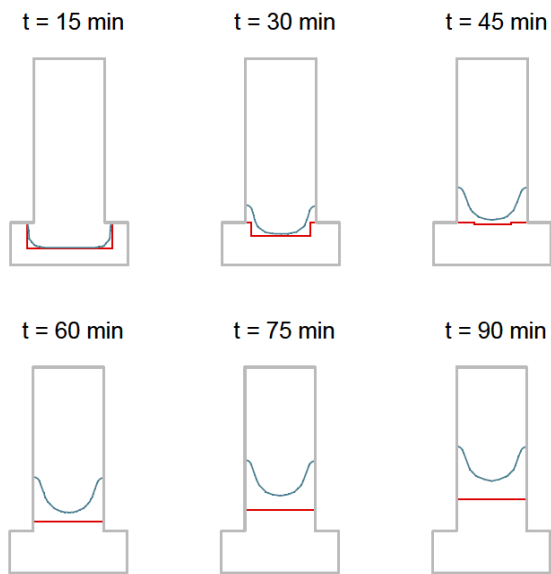


Figura 8. Para una exposición a la curva normalizada, profundidades carbonizadas de la viga de madera según SAFIR (en azul) y según la formulación de la UNE-EN 1995-1-2 [3] (en rojo).

El resultado de la comparación es el que se muestra en la Figura 8. Se puede concluir que considerando la profundidad carbonizada que propone la UNE-EN 1995-1-2 [3] no se está del lado de la seguridad pues subestima los valores que predice SAFIR. Es por ello que, las peculiaridades de la sección transversal de un forjado de viguetas de madera y revoltones de ladrillos hacen que se requiera de un método alternativo de análisis con el que la comprobación de resistencia al fuego quede del lado de la seguridad.

6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

En el momento en que fueron construidos los que conocemos hoy en día como edificios históricos, las normativas actualmente vigentes en relación con la seguridad en caso de incendio no estaban presentes. Es por ello que, satisfacer las exigencias establecidas por la normativa actual en edificios históricos puede ser algo complejo.

En este caso, según los resultados obtenidos del análisis mecánico simplificado que propone la UNE-EN 1995-1-2 [3], solo el

recinto más pequeño, cuya luz de forjado es de 2,8 m, satisface las exigencias de la normativa actual vigente al alcanzar un tiempo de resistencia al fuego superior a los 60 minutos. El forjado cuya luz es de 4 m alcanza una resistencia al fuego de 23 minutos y el de 5 m apenas de 1 minuto.

Los valores de luz escogidos para el análisis se encuentran dentro del rango habitual que podríamos encontrar en un edificio histórico. Además, generalmente, la altura de evacuación de un edificio histórico será inferior a los 15 metros, dado que no suelen presentar más de 4 alturas, con lo que se les exige un tiempo de resistencia al fuego de 60 minutos en lugar de 90 minutos. Cabe destacar que, si el edificio estudiado hubiese sido una vivienda unifamiliar el tiempo de resistencia al fuego a satisfacer es de solo 30 minutos.

Por otro lado, cabe señalar la importancia de la comparación entre las profundidades carbonizadas que propone la UNE-EN 1995-1-2 [3] y las que se obtienen del programa de cálculo SAFIR. La comparación resalta la necesidad de un método de análisis alternativo con el que la comprobación de resistencia al fuego de forjados de viguetas de madera y revoltones de ladrillos que quede del lado de la seguridad.

Respecto al modelo de fuego empleado, la curva normalizada no es representativa de ningún incendio real pues no presenta fase de enfriamiento y podría ser, en muchos casos, un modelo conservador. Del mismo modo, al no depender la curva normalizada de ningún parámetro físico que define el propio incendio ni de las condiciones del recinto en que este ocurre, puede no quedar del lado de la seguridad para ciertas hipótesis posibles de ventilación.

En consecuencia, sería muy recomendable estudiar otros modelos de fuego más avanzados y representativos de un incendio real que la curva normalizada, tales como las curvas paramétricas o los modelos de zonas ambos definidos en la UNE-EN 1991-1-2 [5]. Estos modelos son más realistas pues tienen en cuenta las diferentes fases del incendio y, además, permiten considerar diferentes dimensiones y condiciones de ventilación de los recintos que la curva normalizada no puede representar.

Con todo ello, los distintos modelos de fuego que propone la normativa, pese a tratarse de herramientas muy útiles, no siempre son representativos del escenario estudiado. Por

tanto, sería conveniente llevar a cabo ensayos experimentales que puedan verificar los resultados del análisis numérico realizado, calibrar con modelos 3D más complejos, etc.

En resumen, en ausencia de estudios más detallados, se concluye que existen otros modelos de fuego más avanzados que podrían satisfacer las exigencias de la normativa actual en el caso de edificios históricos que se construyeron en ausencia de esta. De este modo, alterar nuestro patrimonio arquitectónico, que constituye un bien muy preciado, podría evitarse.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad del Gobierno de España por la financiación proporcionada a través del proyecto BIA 2014-59036-R.

Referencias

- [1] F. Vegas, C. Mileto, *Aprendiendo a restaurar. Un manual de restauración de la arquitectura tradicional de la Comunitat Valenciana*, Conselleria de Vivienda, Obras Públicas y Vertebración del Territorio de la Generalitat Valenciana, Valencia, 2017.
- [2] M. Diodato, *Huellas de artesanía constructiva. Características de los forjados históricos de Valencia*, Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Valencia, 21-24 de octubre de 2009, Vol. 1, 2009, ISBN 978-84-9728-3175, págs. 395-404.
- [3] UNE-EN 1995-1-2 (2016), Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera – Parte 1-2: Reglas generales – Proyecto de estructuras sometidas a fuego, AENOR, 2016.
- [4] CTE - Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [5] UNE-EN 1991-1-2 (2004), Eurocódigo 1: Acciones en estructuras – Parte 1-2: Acciones generales – Acciones en estructuras expuestas al fuego, AENOR, 2004.
- [6] F. Arriaga Martitegui, R. Argüelles Álvarez, M. Esteban Herrero, G. Íñiguez González y R. Argüelles Bustillo, *Estructuras de madera - Bases de cálculo*, Madrid: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM), 2018.
- [7] UNE-EN 1996-1-2 (2011), Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica – Parte 1-2: Reglas generales – Proyecto de estructuras sometidas a fuego, AENOR, 2011.
- [8] A. H. Buchanan y A. K. Abu, *Structural design for fire safety*, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2017.
- [9] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Commissione “Beni culturali – NORMAL”. Norma italiana UNI 11119. Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera., Milano (Italia), 2004.
- [10] UNE-EN 1990 (2003), Eurocódigos – Bases de cálculo de estructuras, AENOR, 2003.
- [11] J.-M. Franssen y T. Gernay, *User’s manual for SAFIR 2019 - Mechanical. A computer program for analysis of structures subjected to fire.*, Liege: University of Liege. Department ArGENCO. Service Structural Engineering., 2019.
- [12] J.-M. Franssen y T. Gernay, *User’s manual for SAFIR 2019 - Thermal. A computer program for analysis of structures subjected to fire.*, Liege: University of Liege. Department ArGENCO. Service Structural Engineering., 2019.
- [13] Garcia-Castillo E, Paya-Zaforteza I, Hospitaler A, *Analysis of the fire resistance of a jack arch flooring system submitted to the standard fire curve*, 40th IABSE Symposium: Tomorrow’s Megastructures, IABSE, Nantes (Francia), septiembre 2018, ISBN: 978-3-85748-161-1, Pages: S9-9.