



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de València.

Presentado por

Cailleaux, Tanguy

Para la obtención del

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2020/2021

Fecha: 06/09/2021

Tutor: Payá Zaforteza, Ignacio Javier

ÍNDICE GENERAL

- Memoria
- Anejos
 - Anejo nº1 : Obtención de las curvas paramétricas tiempo-temperatura
 - Anejo nº2 : Resultados de los análisis térmicos
 - Anejo nº3 : Resultados de los análisis mecánicos
 - Anejo nº4 : Cálculos mecánicos de la solución de refuerzo
 - Anejo nº5 : Relación del TFM con los Objetivos del Desarrollo Sostenible
- Planos
 - Plano nº0 : Localización del edificio
 - Plano nº1 : Planta tipo - Distribución de las habitaciones
 - Plano nº2 : Planta tipo – Distribución de las viguetas
 - Plano nº3 : Alzado del edificio
 - Plano nº4 : Sección transversal del forjado
 - Plano nº5 : Isotermas aplicables a los métodos mecánicos simplificados del EC5
 - Plano nº6 : Identificación de las viguetas reforzadas
 - Plano nº7 : Secciones transversales reforzadas

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

Memoria

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	- 1 -
ÍNDICE DE TABLAS	- 3 -
ÍNDICE DE FIGURAS	- 5 -
1 INTRODUCCION	- 7 -
1.1 La necesidad de rehabilitación	- 7 -
1.2 La seguridad en caso de incendio en la edificación	- 10 -
2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	- 12 -
2.1 Introducción la tipología de forjado estudiado : forjado de revoltones	- 12 -
2.2 Descripción del forjado estudiado	- 14 -
2.2.1 Características geométricas	- 14 -
2.2.2 Características físicas	- 15 -
2.3 Descripción del edificio y de los locales estudiados	- 16 -
3 MARCO NORMATIVO	- 18 -
3.1 Normativa empleada	- 18 -
3.2 Exigencias a satisfacer.....	- 19 -
3.3 Propiedades de los materiales.....	- 23 -
3.3.1 Especificidad del comportamiento de la madera expuesta al fuego	- 23 -
3.3.2 Propiedades térmicas	- 24 -
3.3.2.1 Viguetas de madera	- 24 -
3.3.2.2 Ladrillos	- 28 -
3.3.2.3 Mortero de cal hidráulica.....	- 31 -
3.3.2.4 Otros materiales.....	- 31 -
3.3.3 Propiedades mecánicas	- 32 -
4 OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA AL FUEGO DE LOS FORJADOS	- 35 -
4.1 Modelos de fuego	- 35 -
4.1.1 Bases teóricas de los incendios	- 35 -
4.1.1.1 Dinámica de formación y desarrollo de un incendio	- 35 -
4.1.1.2 Mecanismos de transmisión del calor	- 36 -
4.1.2 Fuego normativo ISO 834	- 38 -
4.1.3 Fuegos paramétricos	- 39 -
4.1.3.1 Hipótesis de ventilación	- 40 -
4.1.3.2 Obtención de las curvas paramétricas.....	- 41 -
4.1.3.3 Curvas paramétricas obtenidas	- 47 -
4.2 Modelos térmicos	- 50 -
4.3 Modelos mecánicos	- 54 -
4.3.1 Métodos de cálculo mecánico simplificados del Eurocódigo 5	- 54 -

4.3.1.1	Antecedentes teóricos	- 54 -
4.3.1.2	Valores de cálculo de las acciones estáticas	- 55 -
4.3.1.3	Valores de cálculo de las propiedades mecánicas	- 57 -
4.3.1.4	Método de la sección reducida.....	- 57 -
4.3.1.5	Método de las propiedades reducidas	- 59 -
4.3.2	Modelo mecánico avanzado numérico	- 60 -
4.3.3	Comparación de resultados y conclusiones	- 62 -
5	DISEÑO DE UN SISTEMA DE REFUERZO	- 67 -
5.1	Vigas parteluces.....	- 67 -
5.2	Sustitución funcional mediante perfiles metálicos	- 69 -
5.3	Refuerzo mediante sistemas FRP	- 70 -
5.4	Refuerzo mediante aporte de madera	- 73 -
6	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	- 75 -
7	BIBLIOGRAFÍA	- 78 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficies mínimas de los recintos sin incluir el espacio para el almacenamiento.	16 -
Tabla 2. Dimensiones de los locales objetos del análisis.	17 -
Tabla 3. Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales.	20 -
Tabla 4. Densidad de la madera en función de la temperatura.	25 -
Tabla 5. Capacidad de calor específico de la madera en función de la temperatura.	26 -
Tabla 6. Relación entre temperatura y conductividad para la madera y la capa carbonizada.	27 -
Tabla 7. Valores de cálculo del calor específico de los ladrillos dependientes de la temperatura.	29 -
Tabla 8. Valores de cálculo de la capacidad de conductividad térmica de los ladrillos dependientes de la temperatura.	29 -
Tabla 9. Propiedades del mortero de relleno.	31 -
Tabla 10. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas y procedencias según normas de clasificación.	32 -
Tabla 11. Reglas de clasificación para elementos estructurales de madera in-situ.	33 -
Tabla 12. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b < 70 \text{ mm}$	33 -
Tabla 13. Tensiones máximas para la aplicación del método de tensiones admisibles y módulos medios de elasticidad en flexión, para las categorías in situ de las principales especies de madera, aplicables para una humedad de la madera = 12%.	34 -
Tabla 14. Hipótesis de ventilación del local A.	40 -
Tabla 15. Hipótesis de ventilación del local B.	40 -
Tabla 16. Hipótesis de ventilación del local C.	40 -
Tabla 17. Densidades de carga de fuego para diferentes actividades.	42 -
Tabla 18. Coeficientes $\delta q_1, \delta q_2$	42 -
Tabla 19. Valores de cálculo de la densidad de carga.	43 -
Tabla 20. Coeficientes b de los materiales de la envolvente de los locales.	43 -
Tabla 21. Características de la envolvente del local A.	44 -
Tabla 22. Materiales disponibles en SAFIR.	50 -
Tabla 23. Profundidades de carbonización en función del método de cálculo (mm).	55 -
Tabla 24. Coeficientes de simultaneidad.	55 -
Tabla 25. Cálculo del peso propio del forjado.	56 -
Tabla 26. Resultados del método de la sección reducida para la exposición al fuego normalizado en el local A.	59 -
Tabla 27. Resultados del método de las propiedades reducidas para la exposición al fuego normalizado en el local A.	60 -
Tabla 28. Tiempos de resistencia a fuego del forjado para el local A (7 m^2)	65 -
Tabla 29. Tiempos de resistencia a fuego del forjado para el local B (16 m^2)	65 -

Tabla 30. Tiempos de resistencia a fuego del forjado para el local C (25m ²)	- 65 -
Tabla 31. Modificación del máximo momento flector.	- 68 -
Tabla 32. Resultados de los análisis mecánicos para el refuerzo con un listón de 2cm.	- 74 -
Tabla 33. Resultados de los análisis mecánicos para el refuerzo con un listón de 4 cm.	- 74 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Población mundial estimada y sus proyecciones entre los años 1950 y 2100.	7 -
Figura 2. Emisiones de carbono procedentes de la fabricación de los materiales de construcción.	8 -
Figura 3. Comparación del volumen de trabajo y su repartición para obras de carpinterías.	9 -
Figura 4. Intervenciones por incendios de los servicios de bomberos en España.	10 -
Figura 5. Dibujo del forjado del Palacio Condal de Oliva.	12 -
Figura 6. Morfologías de forjados de revoltones existentes según la zona.	13 -
Figura 7. Fotos del forjado de revoltones de ladrillos bruto (izda.) y con revestimiento en el intradós (dcha.)...	13 -
Figura 8. Sección transversal del forjado estudiado. Sin escala. Cotas en cm.....	14 -
Figura 9. Diagrama que representa la proporción entre luz neta y flecha de las bovedillas de los forjados de revoltones.....	14 -
Figura 10. Nomenclatura de las caras y aristas de un ladrillo.	15 -
Figura 11. Máxima altura de evacuación del edificio.....	21 -
Figura 12. Zonas de degradación en función de la temperatura.	23 -
Figura 13. Zonas de degradación de la madera presentadas en la sección transversal de un elemento expuesto al fuego.....	24 -
Figura 14. Densidad de la madera en función de la temperatura.	25 -
Figura 15. Capacidad de calor específico de la madera en función de la temperatura.....	26 -
Figura 16. Relación entre la temperatura y conductividad térmica para la madera y la capa carbonizada.	27 -
Figura 17. Valores de cálculo de las propiedades de los materiales dependientes de la temperatura para piezas de arcilla cocida con un rango de densidades entre 900 y 1200 kg/m ³	28 -
Figura 18. Valores de cálculo del calor específico de los ladrillos dependientes de la temperatura.	29 -
Figura 19. Valores de cálculo de la capacidad de conductividad térmica de los ladrillos dependientes de la temperatura.	30 -
Figura 20. Desarrollo de un incendio natural.....	35 -
Figura 21. Mecanismos de transferencia de calor.	36 -
Figura 22. Curva normalizada tiempo-temperatura.	38 -
Figura 23. Curva tiempo-temperatura paramétrica para la hipótesis A1.	46 -
Figura 24. Curvas de fuego para el local A.	47 -
Figura 25. Curvas de fuego para el local B.	48 -
Figura 26. Curvas de fuego para el local C.	48 -
Figura 27. Comparación entre la curva normalizada ISO 834 y la curva paramétrica B2.	49 -
Figura 28. Condiciones de contorno del problema térmico.....	52 -
Figura 29. Malla generada y materiales asignados.	52 -

Figura 30. Campo de temperaturas obtenido en SAFIR para el forjado expuesto al fuego normalizado, en el instante $t = 30 \text{ min}$	- 53 -
Figura 31. Campo de temperaturas obtenido en SAFIR para el forjado expuesto al fuego normalizado, en el instante $t = 60 \text{ min}$	- 53 -
Figura 32. Profundidad carbonizada $d_{char, 0}$ para la carbonización unidimensional y profundidad de carbonización ficticia $d_{char, n}$	- 54 -
Figura 33. Coeficiente de reducción para las resistencias paralelas a las fibras de la madera de conífera	- 61 -
Figura 34. Coeficiente de reducción para el módulo de elasticidad paralelo a las fibras de la madera de conífera ...	- 61 -
Figura 35. Campo de tensiones obtenido en SAFIR para las viguetas del local A, sometidas al fuego normalizado, en el instante $t=60 \text{ min}$	- 62 -
Figura 36. Factor de seguridad, Local A, Fuego ISO 834.	- 62 -
Figura 37. Factor de seguridad, Local A, Fuego paramétrico A1.....	- 63 -
Figura 38. Factor de seguridad, Local A, Fuego paramétrico A2.....	- 63 -
Figura 39. Comparación de resultados según la luz de la vigueta.	- 64 -
Figura 40. Forjado de revoltones sin vigueta.	- 66 -
Figura 41. Ejemplo de refuerzo mediante la colocación de una viga parteluz.	- 67 -
Figura 42. Sección transversal del sistema NOUBAU	- 69 -
Figura 43. Ejemplo de aplicación del sistema NOUBAU a un forjado de revoltones de ladrillos.	- 70 -
Figura 44. Refuerzo a flexión mediante aplacado con lámina de fibra de carbono.	- 71 -
Figura 45. Refuerzo a flexión mediante aplacado con barras de fibra de carbono.	- 71 -
Figura 46. Protección al fuego de los sistemas FRP.	- 72 -
Figura 47. Refuerzo de viguetas.	- 73 -

1 INTRODUCCION

1.1 LA NECESIDAD DE REHABILITACIÓN

Fundada en 1945 para salvaguardar la paz, proteger los derechos humanos, establecer el marco de la justicia internacional y promover el progreso económico y social, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha añadido 22 desafíos globales a sus objetivos iniciales, entre los cuales nos interesan particularmente la Población y el Cambio climático.

Cinco años después de su fundación, se registraba una población mundial de 2.600 millones de personas. Se alcanzaron luego los 5.000 millones en 1987 y, en 2011, los 7.000 millones. En su informe conciso La situación demográfica en el mundo, 2014 [1], el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU preveía un incremento de más de 2.000 millones en el horizonte de 2050, llegando a una población de 9.200 personas.

No obstante, la última revisión realizada en el año 2019 [2] contempla un aumento poblacional mucho más drástico, con una previsión de 9.735 millones en 2050 y 10.875 millones en 2100 (fig. 1)

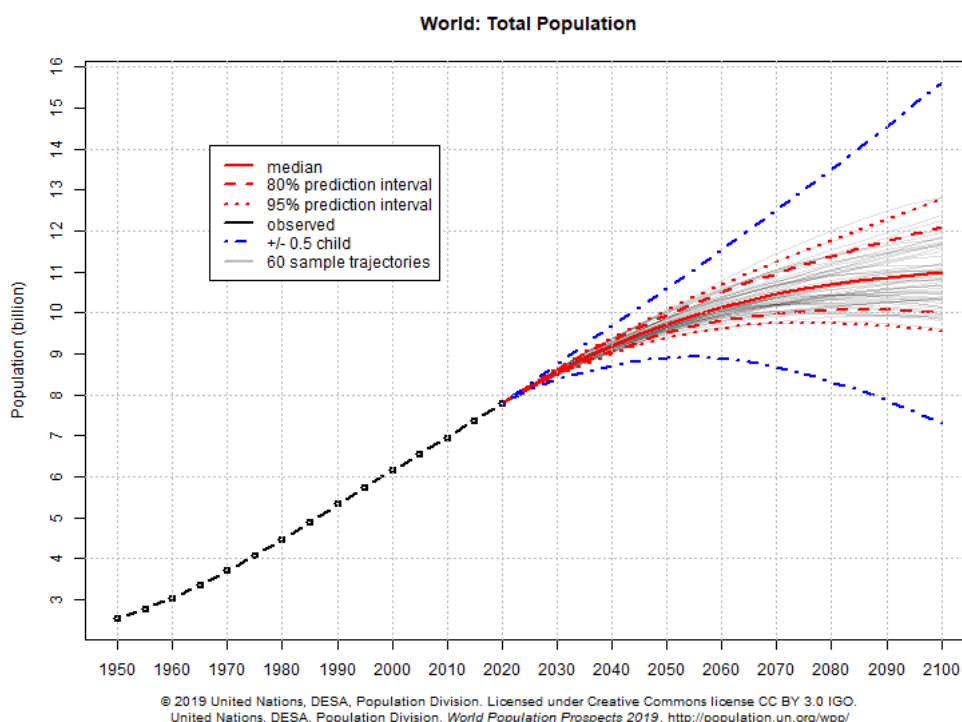


Figura 1. Población mundial estimada y sus proyecciones entre los años 1950 y 2100.

Fuente: <http://population.un.org/wpp/>

Este escenario de crecimiento poblacional viene acompañado por un proceso de continuo éxodo rural. Actualmente, el 55% de las personas en el mundo vive en ciudades y las previsiones para el mismo año 2050 indican que esta cifra aumentará un 13%. Ante el desplazamiento de las poblaciones, se ha de comprender cómo

se desarrollará el proceso de urbanización en los próximos años para cumplir con los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el undécimo de ellos: *Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles*.

Una de las líneas de investigación es la rehabilitación de construcciones existentes. De hecho, frente a la escasez de viviendas en algunas zonas, la respuesta más esperada es la construcción de nuevos edificios. No obstante, la rehabilitación de viviendas existentes representa un reto importante en los planos económico, social, cultural y ambiental.

Por un lado, desde el punto de vista ambiental, la rehabilitación de estructuras en medio urbano permite limitar la ocupación del suelo. Aunque la construcción de un edificio parece insignificante a su escala, la construcción de infraestructuras viarias auxiliares conlleva, por ejemplo, la impermeabilización parcial del suelo, lo que puede provocar problemas de inundaciones en periodos de temporales.

Por otro lado, hoy en día, la restauración de edificios antiguos consiste mayoritariamente en la conservación de las fachadas del mismo y la demolición y reconstrucción de la estructura portante. Actuando de esta forma, se limita el impacto visual exterior pero no se cumplen estrictamente los requisitos del desarrollo sostenible anteriormente citados. En efecto, la reparación o sustitución de elementos dañados o no conformes a las normativas vigentes requiere menores cantidades de material que la ejecución de una estructura nueva. Además, cuando se construye una estructura nueva en un edificio antiguo, suelen emplearse procesos constructivos modernos a base de hormigón armado o acero aunque la manufactura de madera emite menos carbono que la de estos materiales (fig. 2).

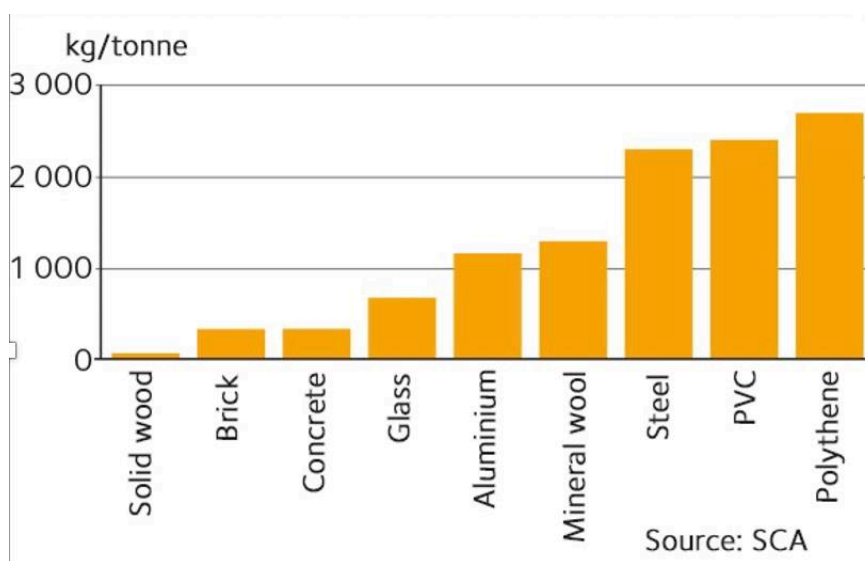


Figura 2. Emisiones de carbono procedentes de la fabricación de los materiales de construcción.

Fuente: www.swedishwood.com

Se debe también considerar que el ciclo de vida de la madera es completo y no genera ningún residuo destinado a vertederos: parte de los residuos de madera se convierte en combustible para las centrales de calefacción; y durante toda su vida útil, la madera emite 0,7 tonelada de dióxido de oxígeno para cada tonelada de CO₂ absorbida mientras que los otros materiales no reaccionan con su ámbito.

Económicamente, la rehabilitación con madera genera, pues, ahorros importantes, pero también impulsa la economía local. De hecho, la carpintería requiere una mano de obra particularmente calificada y especializada, requiriendo así el empleo de artesanos e industrias locales en vez de grandes grupos de la construcción.

La figura 3 traduce gráficamente los argumentos expuestos, comparando las características de la carpintería para una obra nueva (en verde) y un proyecto de restauración (en azul).

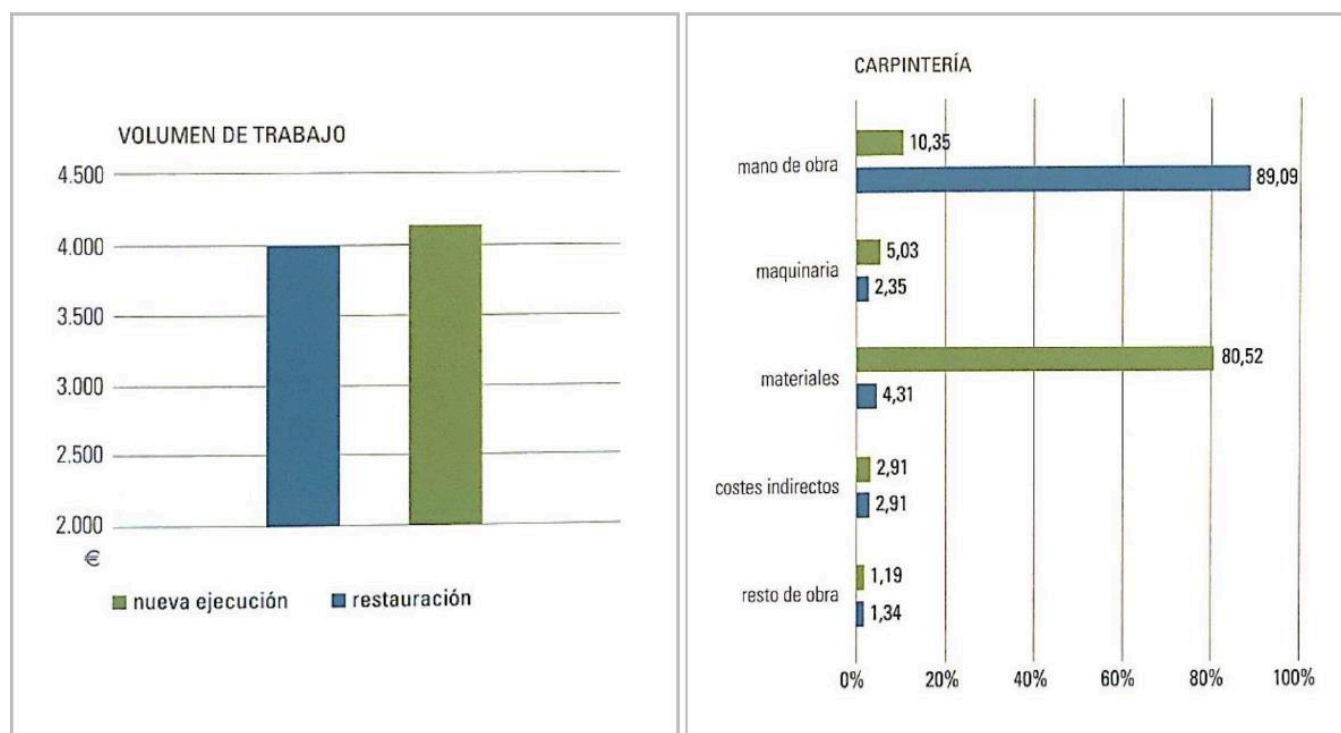


Figura 3. Comparación del volumen de trabajo y su repartición para obras de carpinterías.

Fuente: [3]

Este labor, combinado con la conservación de la forma arquitectural inicial de los edificios antiguos implica la perennidad y la transmisión del patrimonio cultural y social.

No obstante, al haber evolucionado las normativas de cálculo de estructuras desde la construcción de los edificios a rehabilitar, se ha de adaptarlas a los nuevos estándar tal y como lo indica el artículo 1 del Código Técnico de la Edificación [4]: "Las exigencias básicas deben cumplirse en el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios y sus instalaciones.". Más específicamente, el CTE define 6 diferentes exigencias

básicas : seguridad estructural (SE), seguridad en caso de incendio (SI), seguridad de utilización (SU), salubridad (HS), protección frente al ruido (HR) y ahorro de energía (HE).

1.2 LA SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO EN LA EDIFICACIÓN

En el año 2019, se registraron 129.544 intervenciones de bomberos por incendios o explosión, de los cuales 34.029 fueron en edificaciones y, de entre estos últimos, 19.661 fueron en edificios de uso residencial [5].

Comparando los datos de los 6 últimos años registrados, se puede observar que la proporción de incendios en viviendas (gris oscuro en la figura 4) no varía proporcionalmente al número de intervenciones total, e incluso tiende a aumentar con los años.

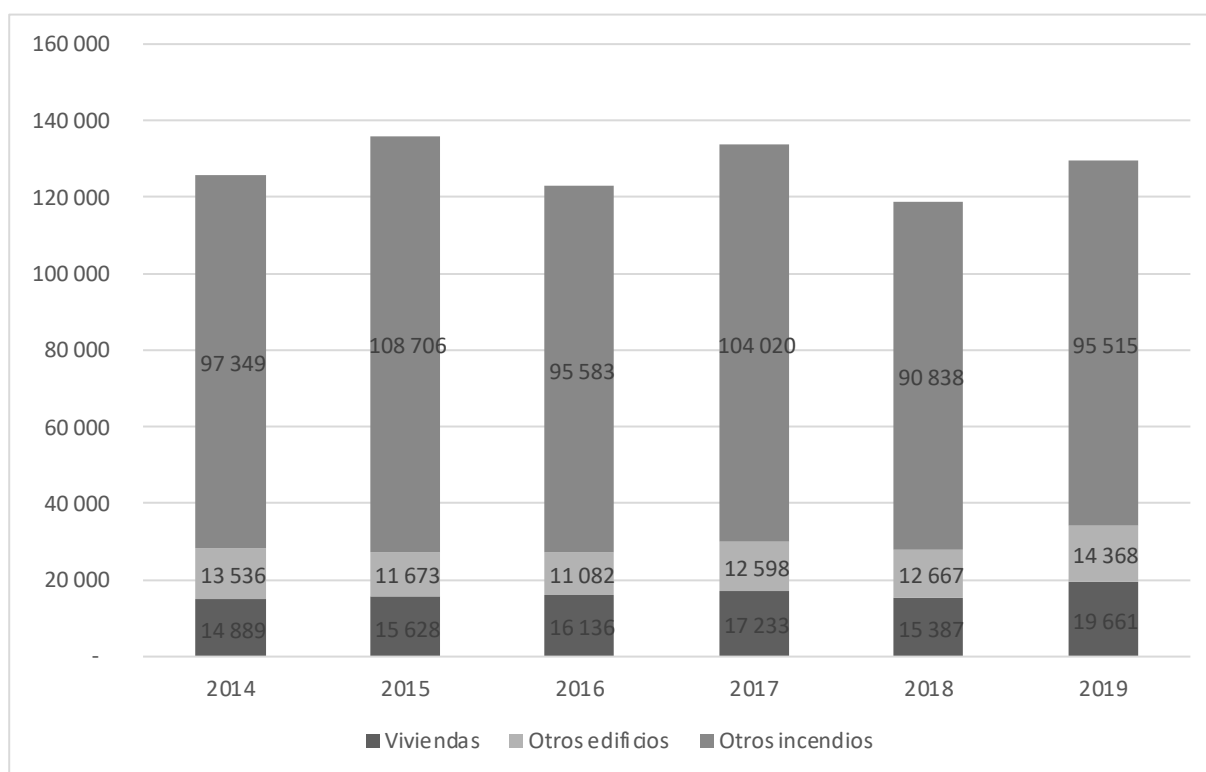


Figura 4. Intervenciones por incendios de los servicios de bomberos en España.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Fundación MAPFRE

Durante el ejercicio 2019, los incendios en España provocaron 165 muertes, de las cuales 125 se produjeron en viviendas, es decir el 76% del total. Estos incendios domésticos se originan principalmente en el salón (40% de los casos), seguidos por los fuegos en habitaciones (23%) y los fuegos en cocina (11%).

Por otro lado, aunque la madera es un material ampliamente empleado en los edificios residenciales, su comportamiento ante el fuego está subestimado. En el pensamiento común, este material tiene poca resistencia a las altas temperaturas, lo que facilita la propagación del fuego. No obstante, la madera es un material mucho más resistente al fuego en comparación con el acero o el hormigón, a pesar de que arde. La capa de carbón vegetal que se crea cuando la madera se somete a temperaturas muy altas representa un muy buen aislamiento que limita la propagación del fuego, seis veces mayor que la madera sin carbonizar. Como resultado, las estructuras de madera tienen muy buena resistencia al fuego, aunque las características intrínsecas de este material disminuyen al aumentar la temperatura.

Por tanto, el presente Trabajo Fin de Máster pretende analizar la resistencia al fuego de un antiguo forjado de revoltones, sostenido por viguetas de madera, estudiando tres habitaciones de tamaños diferentes para cubrir un amplio espectro de escenarios.

En primer lugar, se describirá el edificio objeto de estudio y las características propias del forjado de revoltones. Luego, se establecerá el marco normativo del trabajo, detallando las exigencias básicas a satisfacer y las propiedades de los materiales empleados en la construcción. A partir de estos datos, se realizará el análisis del comportamiento del forjado de revoltones frente a diferentes casos de incendio. Finalmente, se propondrán diferentes soluciones de refuerzo, en caso de ser necesario el mismo.

2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

2.1 INTRODUCCIÓN LA TIPOLOGÍA DE FORJADO ESTUDIADO : FORJADO DE REVOLTONES

Tal y como se ha dicho en el apartado anterior, este Trabajo Fin de Máster se va a dedicar al análisis de la resistencia a fuego de un forjado de tipología particular: el forjado de revoltones. En concreto, se va a analizar un forjado de revoltones de ladrillos, sostenidos por viguetas de madera, típico de la Comunidad Valenciana.

Según el estudio histórico realizado en el artículo [Understanding Spanish Timber Jack Arch Floors: Examples of Assessment and Conservation Issues](#) [6], los primeros ejemplos de forjados de revoltones se remontan a los siglos XV y XVI para ornamentar los lugares y palacios más importantes de la Provincia de Valencia, como por ejemplo el Palacio Condal de Oliva (fig. 5).

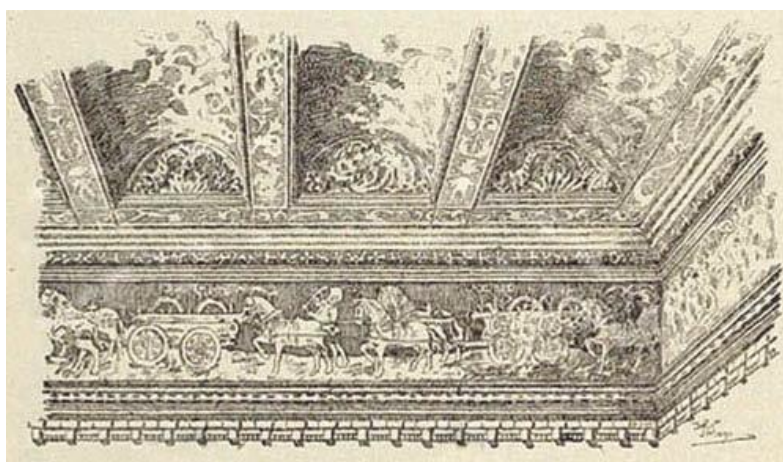


Figura 5. Dibujo del forjado del Palacio Condal de Oliva.

Fuente : [6]

Los forjados de revoltones se extendieron durante el siglo XVIII a toda la Comunidad Valenciana, distinguiéndose dos subfamilias: los forjados de revoltones de ladrillos en la Provincias de Valencia y Castellón, y los de revoltones de ladrillos en la Provincia de Alicante. También existen ejemplos de esta tipología en Zaragoza, en el Palacio de la Aljafería, aún observable hoy en día, y fuera del país en Francia (*plancher à voûtains*), Italia (*solaio con voltine di mattoni*) e Inglaterra (*jack arch floor*).

De forma común, todos los tipos de forjados de revoltones están compuestos por viguetas separadas por bóvedas de timbre. Las tipologías observadas en la Provincia de Alicante suelen ser de viguetas de sección circular de madera y de bóvedas de yeso ya que en las zonas rurales no se disponía de aserraderos y albañilería. En las zonas urbanas de las Provincias de Castellón y Valencia, se observan viguetas de madera más elaboradas, permitiendo el apoyo de los ladrillos sobre los cuales se vertía un mortero de cal. Finalmente, las últimas tipologías que aparecieron durante la Industrialización sustituyeron las viguetas de madera por perfiles metálicos (fig. 6).

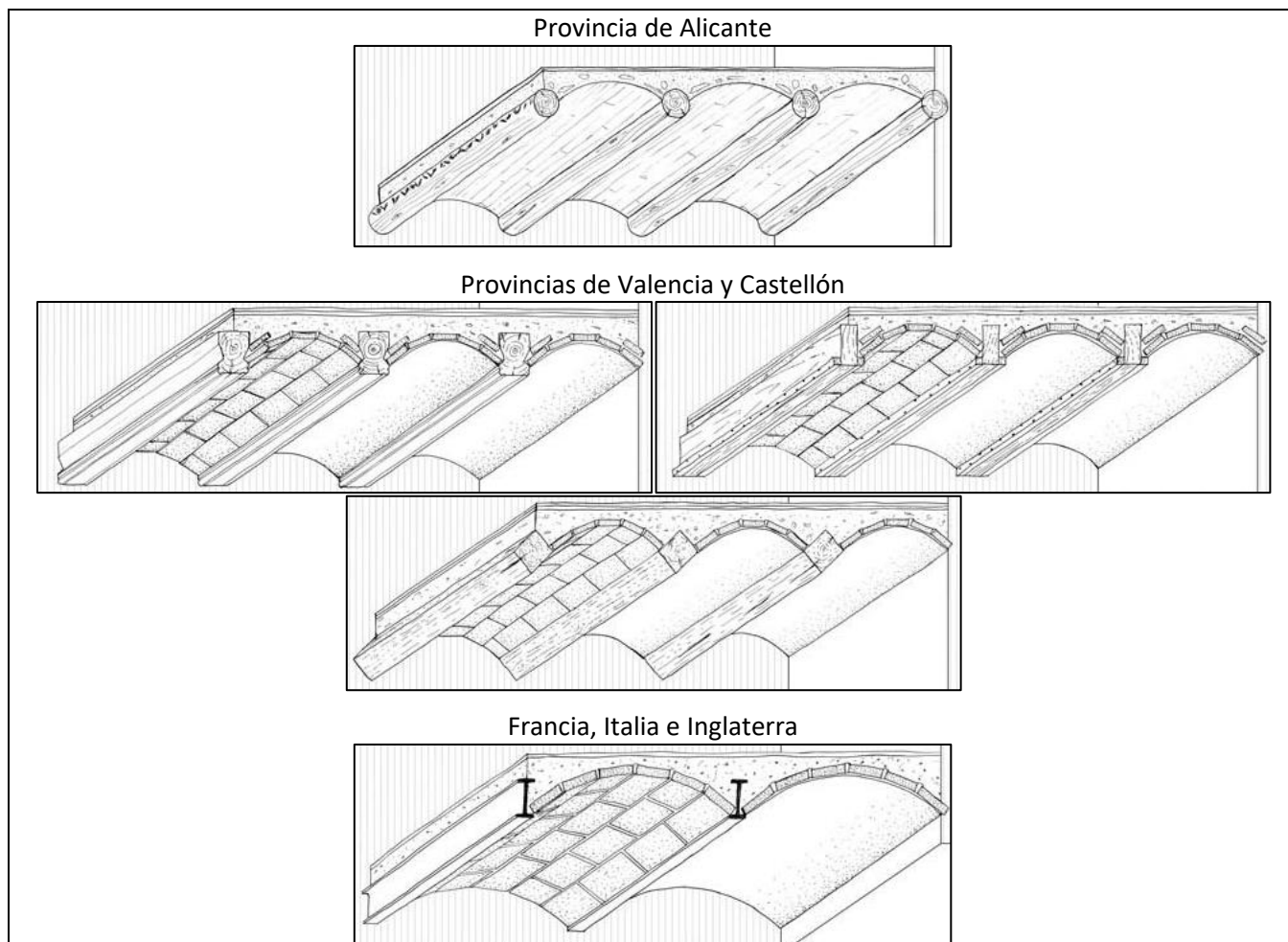


Figura 6. Morfologías de forjados de revoltones existentes según la zona.

Fuente : Adaptación de [6]

De la combinación de las bóvedas tabicadas de ladrillos con las viguetas de madera, resulta un forjado de alto valor cultural y arquitectónico (fig. 7) que conviene conservar a la hora de rehabilitar y reforzar los edificios históricos de la ciudad de Valencia.



Figura 7. Fotos del forjado de revoltones de ladrillos bruto (izda.) y con revestimiento en el intradós (dcha.)

Fuente: www.ceramicabaucells.com (izda.) y www.lacasadelaconstruccion.es

2.2 DESCRIPCIÓN DEL FORJADO ESTUDIADO

2.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

El forjado estudiado (fig. 8) constituye la estructura horizontal de un edificio ubicado en el centro histórico de la ciudad de Valencia, el cual se describirá en el apartado siguiente.

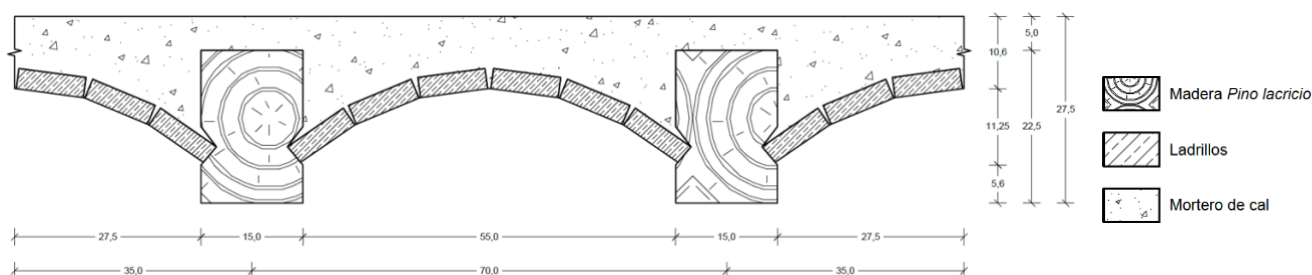


Figura 8. Sección transversal del forjado estudiado. Sin escala. Cotas en cm

Fuente: Elaboración propia [Plano n°4].

Relacionando la luz neta de 55,0 cm con la flecha de 16,85 cm, se obtiene una proporción de 3,26. Esta proporción condiciona la cantidad de mortero de cal necesaria, de forma que cuando se tiene una flecha baja se necesita una cantidad excesiva de relleno, lo que aumenta el peso del forjado. Además, una luz neta elevada en comparación con la flecha del elemento modifica su comportamiento estructural: mientras los elementos ligeramente rebajados trabajan como arcos, es decir con esfuerzos de compresión en los ladrillos, las bóvedas más rebajadas pueden ocasionar esfuerzos de flexión, los cuales no son deseables en las estructuras de fábrica.

Según la clasificación establecida por Maria Diodato [7], la proporción del forjado estudiado se asemeja a la mayor parte de los forjados estudiados: el 64% de ellos tenían una proporción comprendida entre 3,5 y 5 (fig. 9).

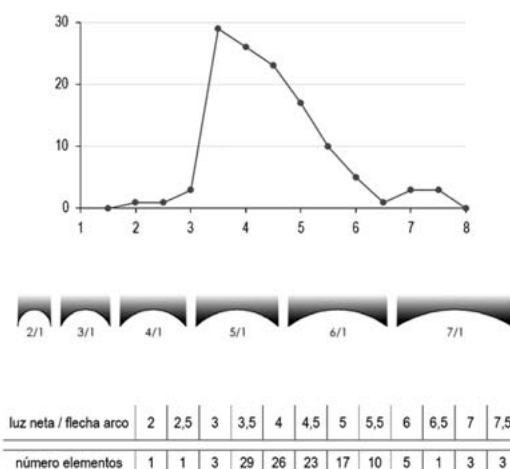


Figura 9. Diagrama que representa la proporción entre luz neta y flecha de las bovedillas de los forjados de revoltones.

Fuente: [7]

A continuación, se detallan los 3 materiales que constituyen la sección transversal del forjado objeto de estudio.

2.2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las viguetas de madera aserrada son de sección rectangular de 15,0 cm de ancho y 22,5 cm de canto. En sus laterales, presentan dos muescas que actúan como apoyos para los ladrillos. Según el inventario detallado en [6], basado en el análisis microscópico de la madera de varios forjados de la Comunidad Valenciana, la totalidad de las viguetas de madera presentes en las ciudades de Valencia y Benicarló pertenecen al grupo de especies *Pinus sylvestris/nigra*. Considerando las especies presentes en las áreas próximas a Valencia, se considera que la madera empleada es el Pino laricio (*Pinus nigra Arnold*).

En cuanto a los ladrillos que forman la bovedilla, se caracterizan por sus dimensiones que tienen la particularidad de poder manejarlos con una mano. Tal y como se puede apreciar en la figura 10, las tres dimensiones son el grueso, el tizón y la soga. En el caso presente, se estudian ladrillos 3x10x22.

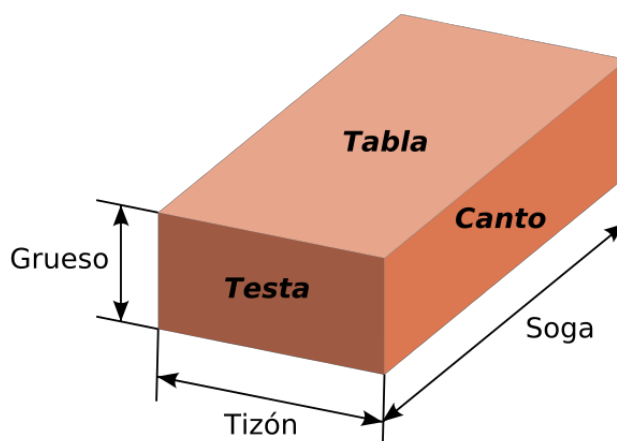


Figura 10. Nomenclatura de las caras y aristas de un ladrillo.

Fuente: www.wikiwand.com

Finalmente, el relleno suele ser un mortero de cal en el cual pueden encontrarse cascotes de ladrillos.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y DE LOS LOCALES ESTUDIADOS

Para realizar el análisis de la resistencia al fuego de los forjados de revoltones, se va a estudiar un edificio del centro de Valencia, de una altura total de 16,835 m. En particular, para contemplar un amplio espectro de escenarios de fuego, se van a realizar los cálculos en tres locales de tamaños distintos. De hecho, aunque la mayoría de los cálculos de seguridad en caso de incendio se realizan considerando la curva de fuego normalizado ISO 834, la norma UNE-EN 1991-1-2:2019 establece, en su Anexo A, curvas paramétricas tiempo-temperatura teniendo en cuenta las dimensiones y otras características del local en el que se inicia el incendio. Los distintos modelos de fuego se detallan en el apartado 4.1.

La definición de los locales a estudiar se basa en las superficies mínimas de los recintos que componen una vivienda (tabla 1), establecidas por la Orden de 7 de diciembre de 2009, de la Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, por la que se aprueban las condiciones de diseño y calidad en desarrollo del Decreto 151/2009 de 2 de octubre, del Consell [8]. Se añade a estas exigencias que “en las viviendas de dos o más dormitorios, al menos uno de ellos tendrá 10 m² útiles”.

Tabla 1. Superficies mínimas de los recintos sin incluir el espacio para el almacenamiento.

Tipos	Superficie (m ²)
Dormitorio sencillo	6
Dormitorio doble	8
Cocina	5
Comedor	8
Cocina-comedor	12
Estar	9
Estar-comedor	16
Estar-comedor-cocina	18
Dormitorio-estar-comedor-cocina	21
Baño	3
Aseo	1,5

Fuente : [8]

En consecuencia, se ha decidido estudiar un dormitorio sencillo de 7 m² (local A [Plano n°1]), un salón de 25 m² (local C) y una habitación de tamaño intermedio de 16 m² (local B). La tabla 2 detalla las características de los locales estudiados: superficie, luz de las viguetas del forjado [Plano n°2], altura [Plano n°3], número y tamaño de las puertas y ventanas.

Tabla 2. Dimensiones de los locales objetos del análisis.

	Local A	Local B	Local C
Superficie	7 m ²	16 m ²	25 m ²
Altura	3,40 m	3,40 m	3,40 m
Luz	2,47 m	4,08 m	4,87 m
Puertas	Puerta 0,83 x 2,15 m	Puerta 0,83 x 2,15 m	Puerta 0,83 x 2,15 m
		Puerta corredora 0,93 x 2,15 m	2 puertas corredoras 0,93 x 2,15 m
Ventanas	Puerta-ventana 1,06 x 2,25 m	Ventana 1,04 x 1,20 m	3 puertas-ventanas 1,06 x 2,25 m

Por otra parte, para obtener las curvas paramétricas tiempo-temperatura, se deben conocer los materiales de la envolvente de los locales, y las condiciones de ventilación. Dichas hipótesis de ventilación se expondrán en el apartado 4.1.3.1.

En cuanto a los materiales de las envolventes, se supondrá que los muros exteriores e interiores de mampostería de ladrillos tienen respectivamente un espesor de 38,5 cm y 18,5 cm, ambos revestidos por 1,5 cm de enlucido de yeso en el interior. En el interior, también existen sistemas de tabiquerías de yeso de 5 y 10 cm. El suelo presenta un espesor de 6,5 cm de baldosas cerámicas.

3 MARCO NORMATIVO

3.1 NORMATIVA EMPLEADA

Las diferentes normativas empleadas para realizar el análisis objeto del presente informe son las siguientes:

- UNE-EN 1990:2019 – Eurocódigos : Bases de cálculo de estructuras.
- UNE-EN 1991-1-1:2003 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-1: Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios, y sobrecargas de uso en edificios.
- UNE-EN 1991-1-2:2004 - Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego.
- UNE-EN 1995-1-1:2016 Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.
- UNE-EN 1995-1-2:2016 Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.
- UNE-EN 1996-1-2:2011 Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.
- UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.
- UNI 11119 Cultural heritage. Wooden artefacts. Load-bearing structures - On-site inspections for the diagnosis of timber members.
- Código Técnico de la Edificación (CTE) – Documento Básico – Seguridad Estructural – Acciones en las Estructuras (DB SE-AE).
- Código Técnico de la Edificación (CTE) – Documento Básico – Seguridad Estructural – Madera (DB SE-M).
- Código Técnico de la Edificación (CTE) – Documento Básico – Seguridad en caso de Incendio (DB SI).

3.2 EXIGENCIAS A SATISFACER

Tal y como se ha indicado en la introducción, la definición de las exigencias a satisfacer para el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios se establece en el CTE. Estas exigencias se basan en los requisitos básicos de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE).

Concretamente, la primera parte del CTE describe las Exigencias Básicas a satisfacer, las cuales se detallan en los Documentos Básicos (DB) que forman la segunda parte del Código. En el ámbito de la seguridad, existen tres subdivisiones: la seguridad estructural, la seguridad en caso de incendio y la seguridad de utilización.

En el presente caso, los requisitos básicos a cumplir serán los del Documento Básico – Seguridad en caso de Incendio (SI). Este DB tiene por objetivo “reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento” (Artículo 11). Más específicamente, se han de satisfacer 6 Exigencias básicas:

- Exigencia básica SI 1: Propagación interior : “Se limitará el riesgo de propagación del incendio por el interior del edificio, tanto al mismo edificio como a otros edificios colindantes” (Artículo 11.1).
- Exigencia básica SI 2: Propagación exterior : “Se limitará el riesgo de propagación del incendio por el exterior, tanto en el edificio considerado como a otros edificios” (Artículo 11.2).
- Exigencia básica SI 3: Evacuación de ocupantes : “El edificio dispondrá de los medios de evacuación adecuados para facilitar que los ocupantes puedan abandonarlo o alcanzar un lugar seguro dentro del mismo en condiciones de seguridad” (Artículo 11.3).
- Exigencia básica SI 4: Instalaciones de protección contra incendios : “El edificio dispondrá de los equipos e instalaciones adecuados para hacer posible la detección, el control y la extinción del incendio, así como la transmisión de la alarma a los ocupantes” (Artículo 11.4).
- Exigencia básica SI 5: Intervención de bomberos : “Se facilitará la intervención de los equipos de rescate y de extinción de incendios” (Artículo 11.5).
- Exigencia básica SI 6: Resistencia estructural al incendio : “La estructura portante mantendrá su resistencia al fuego durante el tiempo necesario para que puedan cumplirse las anteriores exigencias básicas” (Artículo 11.6).

El análisis se centrará en la última de estas exigencias: Resistencia estructural al incendio.

Según el DB-SI, sección SI 6, “se admite que **un elemento tiene suficiente resistencia al fuego si, durante la duración del incendio, el valor de cálculo del efecto de las acciones, en todo instante t, no supera el valor de la resistencia de dicho elemento**” (Artículo 2, párrafo 1).

Además, para los elementos estructurales principales, denominación procedente para los forjados de revoltones estudiados, “Se considera que **la resistencia al fuego de un elemento estructural principal** del edificio (incluidos forjados, vigas y soportes), **es suficiente si:**

- a) **alcanza la clase indicada en la tabla 3.1** (tabla 3) o 3.2 que representa el tiempo en minutos de resistencia ante la acción representada por la curva normalizada tiempo temperatura, o
- b) **soporta dicha acción durante el tiempo equivalente de exposición al fuego indicado en el anejo B.**

Tabla 3. Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales.

Uso del <i>sector de incendio</i> considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante altura de evacuación del edificio		
		<15 m	<28 m	≥28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)		R 90		
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)		R 120 ⁽⁴⁾		

⁽¹⁾ La *resistencia al fuego* suficiente de un suelo es la que resulte al considerarlo como techo del *sector de incendio* situado bajo dicho suelo.

⁽²⁾ En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la *resistencia al fuego* exigible a edificios de uso *Residencial Vivienda*.

⁽³⁾ R 180 si la *altura de evacuación* del edificio excede de 28 m.

⁽⁴⁾ R 180 cuando se trate de *aparcamientos robotizados*.

Fuente : Tabla 3.1., DB-SI, CTE Parte II

La altura de evacuación del edificio se refiere a “la máxima diferencia de cotas entre un origen de evacuación y la salida de edificio que le corresponda. A efectos de determinar la altura de evacuación de un edificio no se consideran las plantas en las que únicamente existan zonas de ocupación nula.” (Anexo A. Terminología del DB-SI). Tal y como se puede apreciar en la figura 11, la máxima altura de evacuación del edificio es de 13.35 m, lo que corresponde a la azotea accesible.

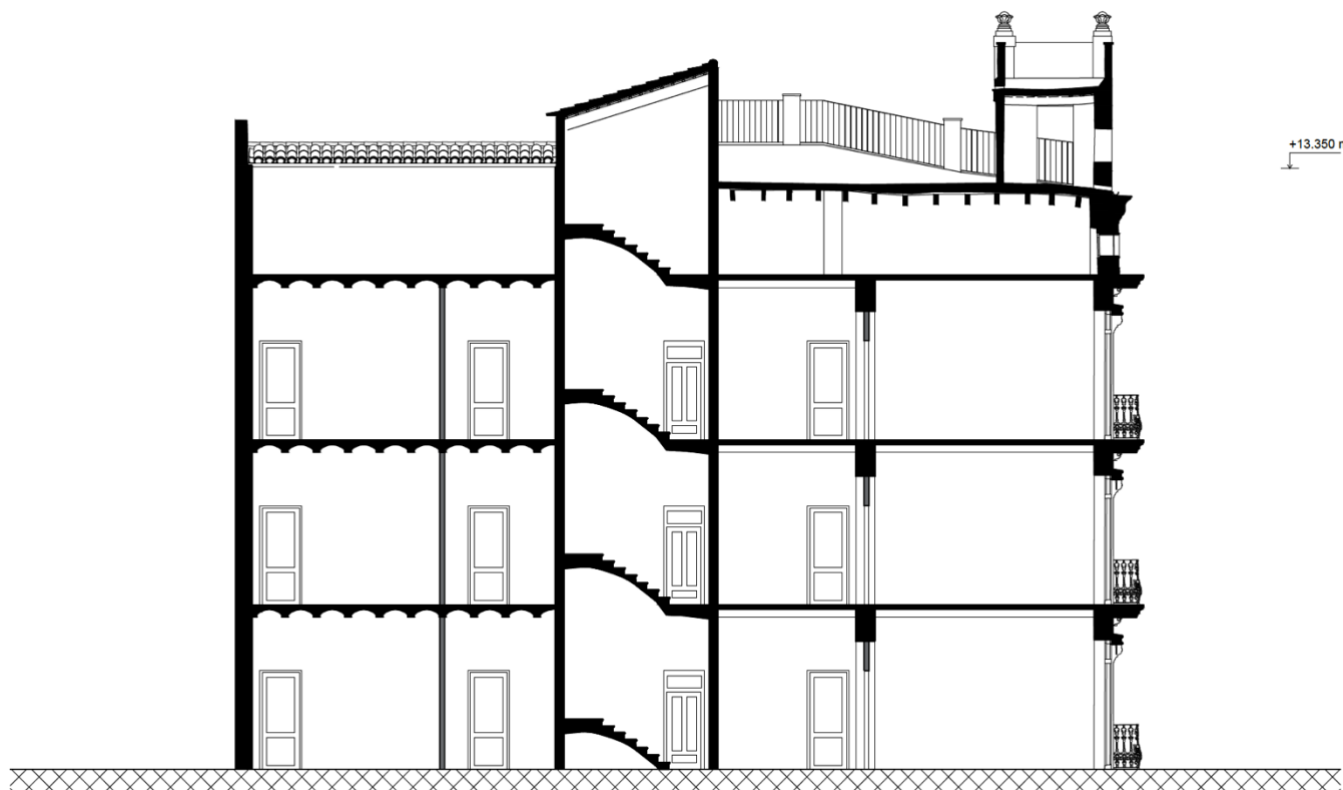


Figura 11. Máxima altura de evacuación del edificio.

Fuente: Elaboración propia [Plano n°3].

Por tanto, siguiendo las indicaciones de la tabla 7, el forjado debe presentar una resistencia al fuego de **60 minutos**.

No obstante, el CTE especifica que esta resistencia al fuego se basa en el modelo de curva normalizada tiempo-temperatura. Para los modelos de curvas paramétricas, el análisis térmico no debe limitarse a estos criterios sino que se debe hacer “para toda la duración del incendio, incluida la fase de enfriamiento” (Artículo 2.4, párrafo 4 de la UNE-EN 1991-1-2:2019). En cuanto al análisis mecánico, su duración debe ser la misma que la del análisis térmico (Artículo 2.5, párrafo 1 de la UNE-EN 1991-1-2:2019).

Para llegar a la obtención de la resistencia al fuego de un elemento estructural en situación de incendio, la UNE-EN 1991-1-2:2019 indica las etapas sucesivas del cálculo a realizar en su apartado 2.1. *Generalidades*.

En primer lugar, se seleccionan los escenarios de fuego de cálculo oportunos y se determinan los fuegos de cálculo correspondientes. los cuales se definirán en el apartado 4.1 del presente informe.

A partir de las curvas tiempo-temperatura obtenidas y de las propiedades térmicas de los materiales que constituyen el forjado, se realiza el análisis térmico permitiendo apreciar la evolución de la temperatura del

elemento a lo largo del tiempo. Para ello, se empleará el software SAFIR mediante el cual se aplicará la curva tiempo-temperatura procedente a las caras del elemento directamente expuestas al fuego.

Finalmente, a partir de los campos de temperaturas calculados, se efectúa el análisis mecánico a través de métodos simplificados y/o avanzados. Los métodos simplificados son los expuestos en la UNE-EN 1995-1-2:2019 y se basan principalmente en las propiedades mecánicas de los materiales a temperatura ambiente. Al contrario, los métodos avanzados consideran el comportamiento real del material frente a una agresión térmica y, por tanto, requieren conocer las variaciones de las propiedades mecánicas en función de la temperatura.

3.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

3.3.1 ESPECIFICIDAD DEL COMPORTAMIENTO DE LA MADERA EXPUESTA AL FUEGO

Cuando se expone al fuego, la madera se degrada como resultado de la descomposición química, convirtiendo sus componentes en gases volátiles y dejando residuos de carbonización. La combustión espontánea en la superficie de la madera puede producirse a temperaturas de 300°C a 430°C, pero también durante la exposición prolongada a temperaturas de aproximadamente 150°C.

Por otro lado, el grado de degradación térmica depende de la temperatura y la duración de la exposición.

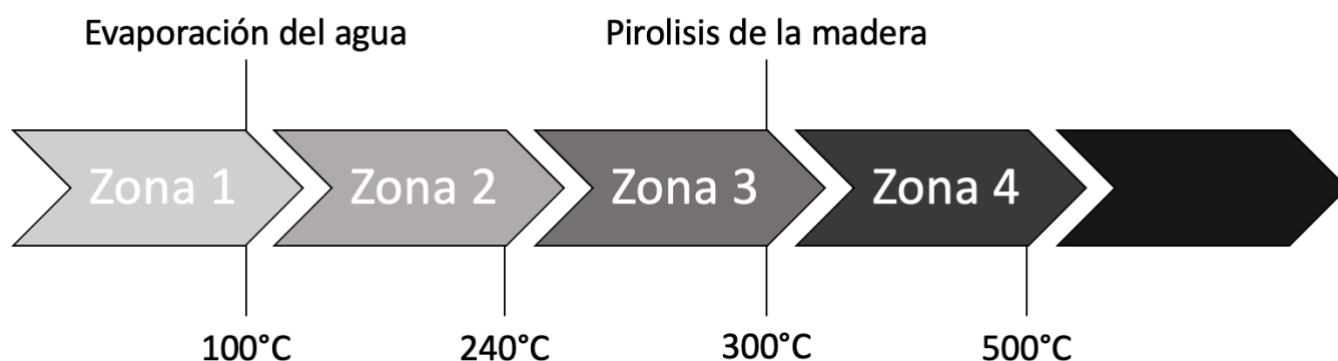


Figura 12. Zonas de degradación en función de la temperatura.

Fuente: Adaptación de [9]

Para temperaturas inferiores a 100°C (zona 1 en la figura 12), el efecto instantáneo del calor sobre las características de la madera es reversible. Sin embargo, la exposición prolongada a temperaturas superiores a 65°C hace aparecer alteraciones remanentes de las características mecánicas.

Cuando se alcanzan los 100°C, la madera sufre una pérdida rápida de su agua libre y luego de su agua ligada. La temperatura aumenta muy poco hasta que toda el agua se evapora. Después, una rápida subida de la temperatura ocurre, originando una pérdida lenta del peso sólido hasta 240°C (zona 2): es el fenómeno de pirolisis. A partir de esta temperatura, la pirolisis de la madera emite gases inflamables hasta alcanzar los 300°C (zona 3). Superados los 300°C, se considera que la madera es carbonizada. Pues, las capas de carbonización se superponen por conducción.

La figura 13 presenta la sección transversal de un elemento de madera sometido a una exposición al fuego. Se pueden apreciar la capa carbonizada (zona negra), la capa de pirólisis (en rojo) y la zona central intacta (en verde).

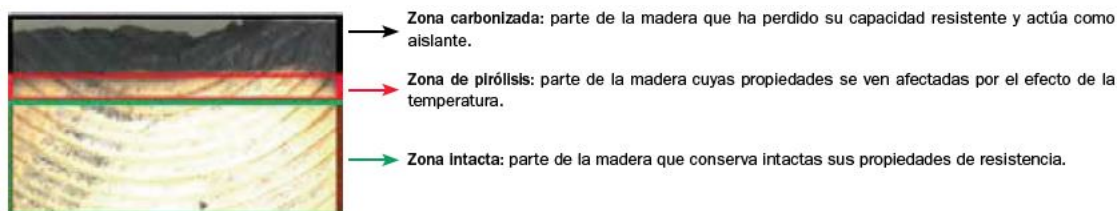


Figura 13. Zonas de degradación de la madera presentadas en la sección transversal de un elemento expuesto al fuego

Fuente: [10]

Por consecuencia de este comportamiento particular frente el fuego, resulta evidente que las propiedades térmicas y mecánicas de la madera varían en función de su temperatura.

3.3.2 PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas de los materiales necesarias para llevar a cabo el análisis térmico de los elementos del forjado son la densidad ρ , la conductividad térmica λ y la capacidad de calor específico c_p .

3.3.2.1 VIGUETAS DE MADERA

Como se ha comentado anteriormente, es muy habitual que la madera empleada para la construcción de los forjados de revoltones de ladrillos en la Provincia de Valencia sea el Pino laricio. Según el estudio realizado por Santiago Vignote Peña [11], la densidad media medida a temperatura ambiente (20°C) para esta especie es de 575 kg/m³. Se trata, pues, de una madera semipesada que tenderá a arder más rápidamente que las especies frondosas (roble, olmo, encina...).

Para obtener la conductividad térmica, la capacidad de calor específico y la densidad real en función de la temperatura de la madera se debe conocer la humedad de la misma. Se considera que la madera secada al ambiente presenta una humedad comprendida entre 16% y 18% [12]. A continuación, se considerará el valor más desfavorable, es decir 18%.

La tabla 4 y la figura 14 representan la variación de la densidad en función de la temperatura, según los valores establecidos por la tabla B.2 del Anexo B. *Métodos de cálculo avanzados* de la UNE-EN 1995-1-2:2016.

Tabla 4. Densidad de la madera en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	r/ r seco	r (kg·m ⁻³)
20	1,18	575,0
99	1,18	575,0
99	1,18	575,0
120	1,00	487,3
120	1,00	487,3
200	1,00	487,3
250	0,93	453,2
300	0,76	370,3
350	0,52	253,4
400	0,38	185,2
600	0,28	136,4
800	0,26	126,7
1200	0,00	0,0

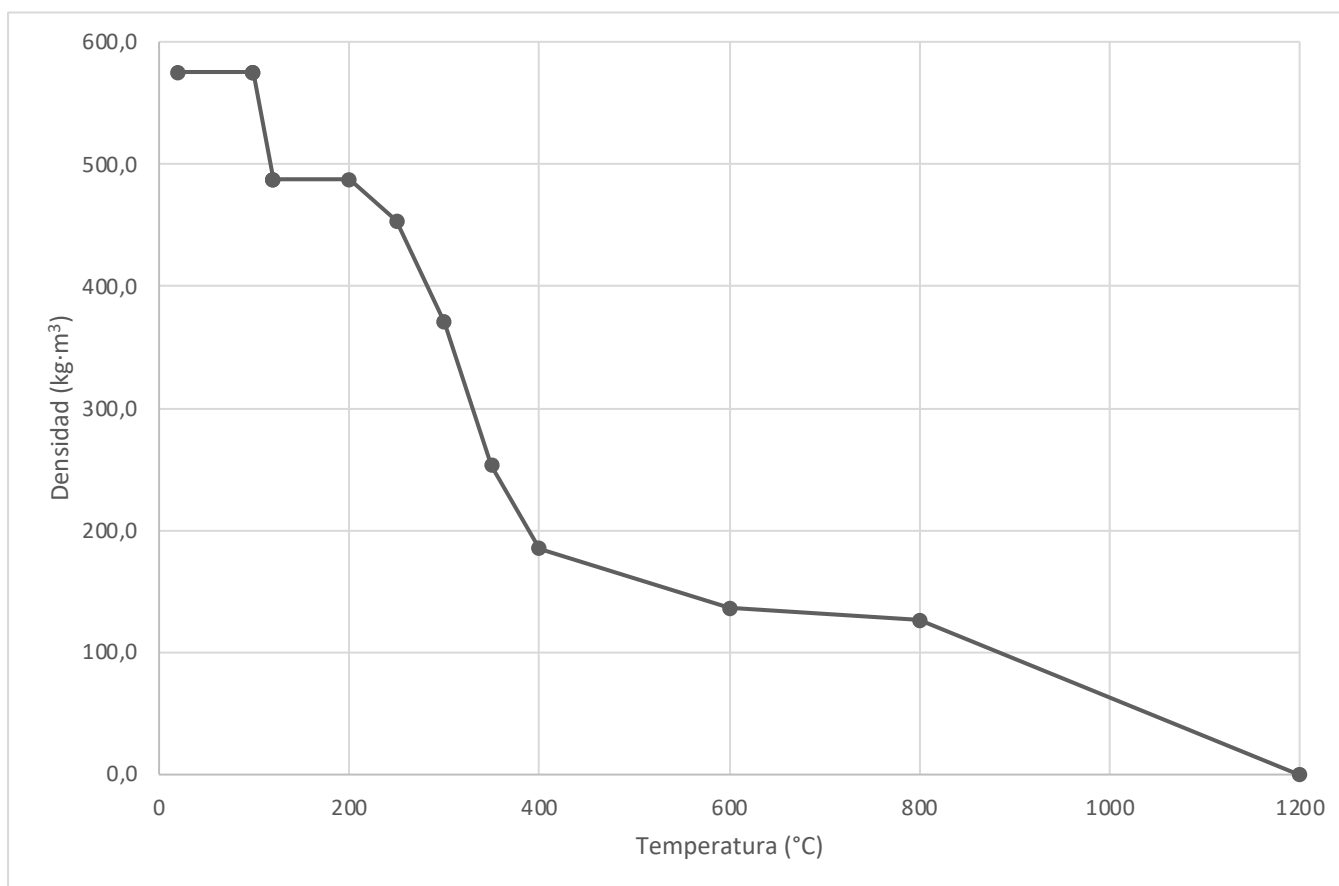


Figura 14. Densidad de la madera en función de la temperatura.

La misma tabla de la UNE-EN 1995-1-2:2016 establece también la evolución de la capacidad de calor específico en función de la temperatura (tabla 5 y figura 15).

Tabla 5. Capacidad de calor específico de la madera en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Capacidad de calor específico (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

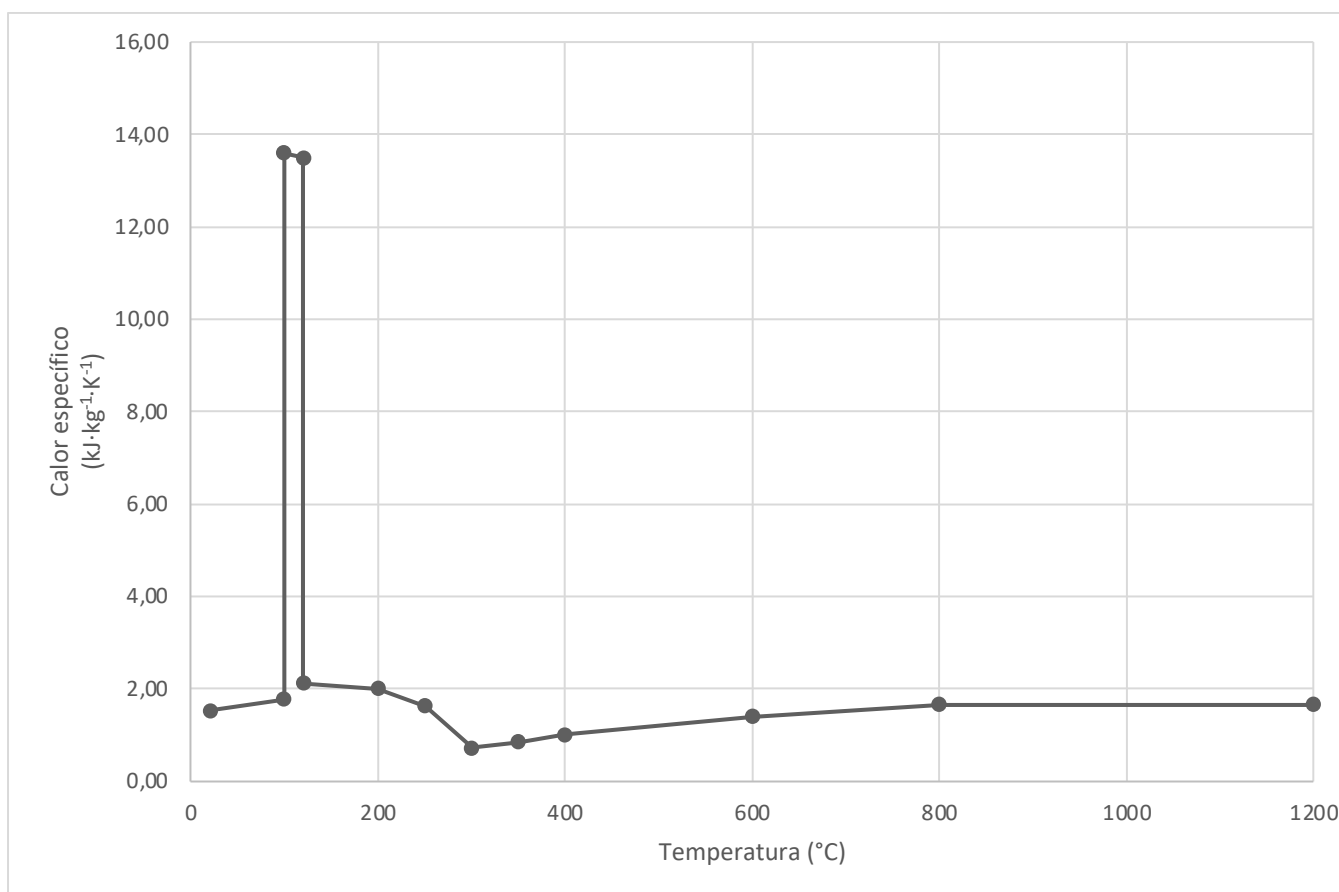


Figura 15. Capacidad de calor específico de la madera en función de la temperatura

Cabe destacar que el pico observado entre 99 y 120°C corresponde a la evaporación del agua de la madera, expuesta en el apartado 3.3.1.

Finalmente, la relación entre temperatura y conductividad térmica de la madera se define en las tabla y figura B.1 de la UNE-EN 1995-1-2:2016 (tabla 6 y figura 16).

Tabla 6. Relación entre temperatura y conductividad para la madera y la capa carbonizada.

Temperatura (°C)	Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

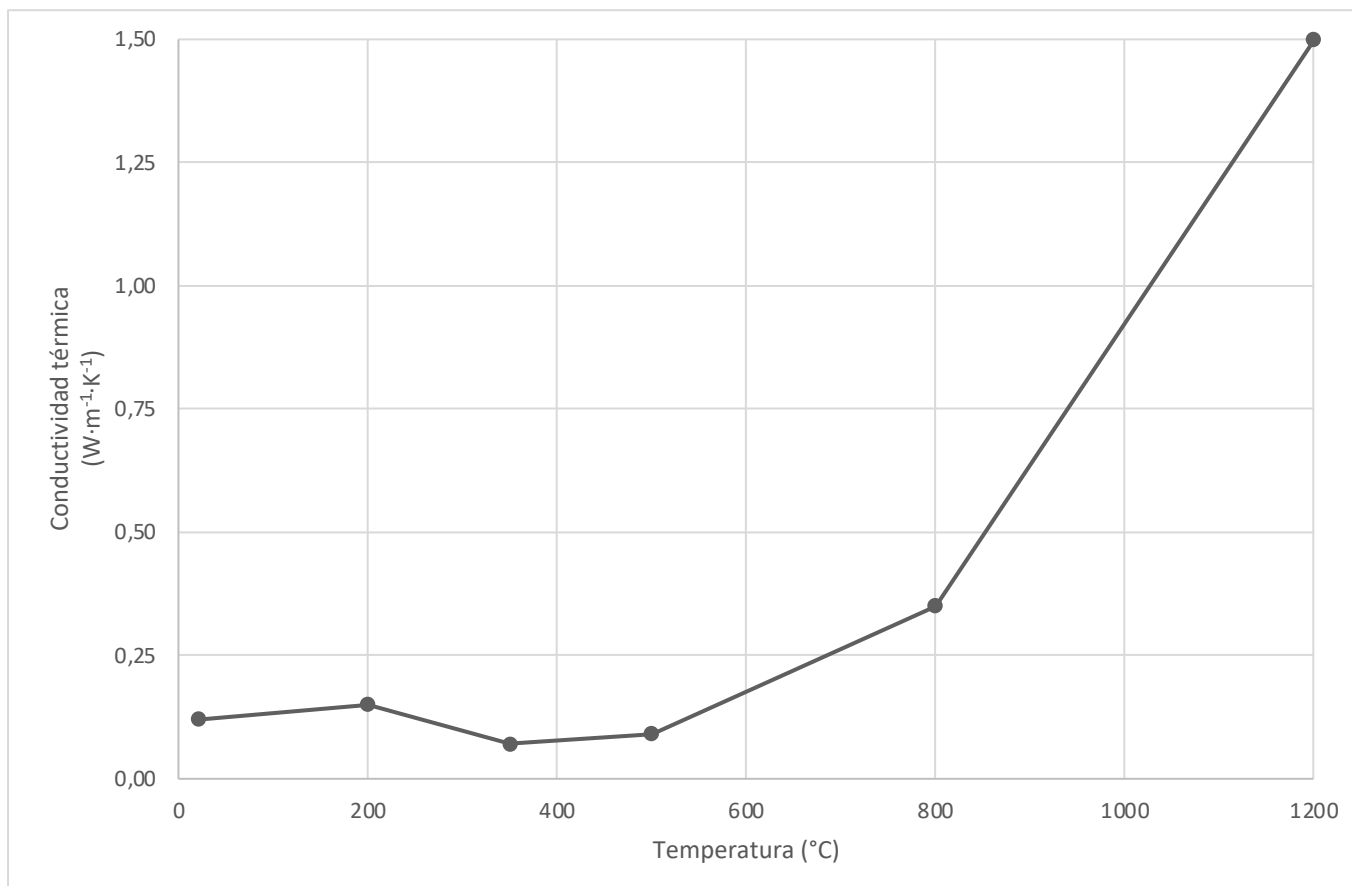


Figura 16. Relación entre la temperatura y conductividad térmica para la madera y la capa carbonizada.

3.3.2.2 LADRILLOS

Los ladrillos que constituyen el forjado tienen una densidad de 1800 kg/m^3 . Debido a la naturaleza refractaria de la arcilla cocida, esta densidad se considera constante durante todo el incendio.

La conductividad térmica y la capacidad de calor específico de los ladrillos se obtienen de la figura D.1(a) del Anexo D. Método general de cálculo de la UNE-EN 1996-1-2:2011 (fig. 17). Esta especifica una conductividad térmica de $0,42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y una capacidad de calor específico de $564 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

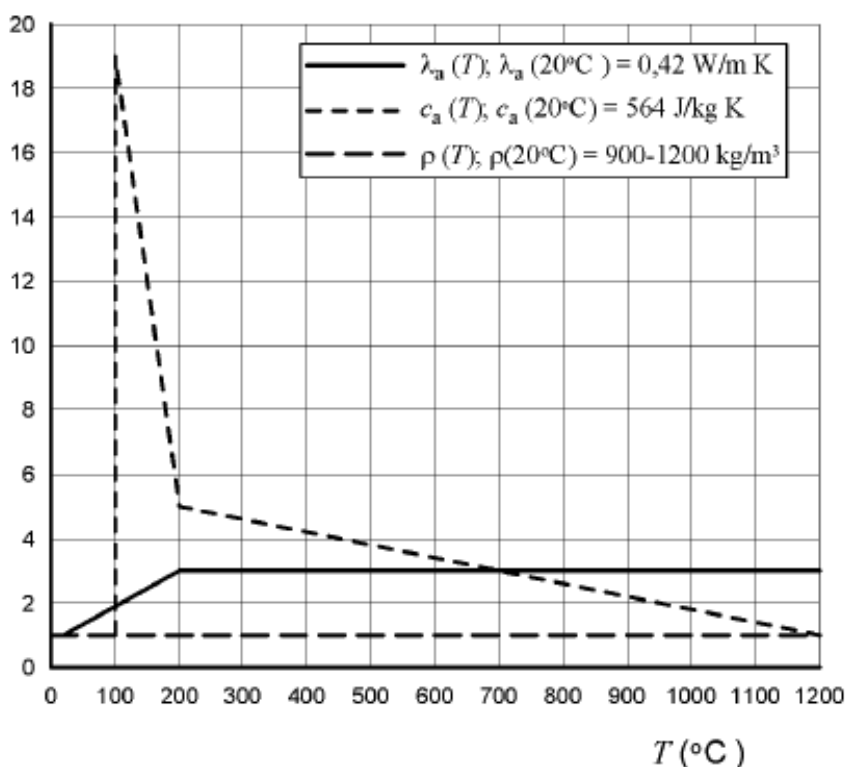


Figura 17. Valores de cálculo de las propiedades de los materiales dependientes de la temperatura para piezas de arcilla cocida con un rango de densidades entre 900 y 1200 kg/m^3 .

Fuente: Figura D.1(a) de la UNE-EN 1996-1-2:2011.

No obstante, la figura está calibrada para piezas de arcilla cocida con un rango de densidades entre 900 y 1200 kg/m^3 y conviene adaptarla a las condiciones reales del caso estudiado. En la literatura [12], un valor recurrente de la capacidad de calor específico del ladrillo común de 1800 kg/m^3 es de $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Entonces, se va a emplear este valor en el estudio, conservando el factor de multiplicación propuesto en la figura 18. La tabla 7 y la figura 18 detallan la evolución del calor específico en función de la temperatura de los ladrillos.

Tabla 7. Valores de cálculo del calor específico de los ladrillos dependientes de la temperatura.

Temperatura (°C)	Relación $c_{p,T}/c_{p,20^{\circ}\text{C}}$	Capacidad de calor específico (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	1	840,00
100	1	840,00
100	19	15960,00
200	5	4200,00
1200	1	840,00

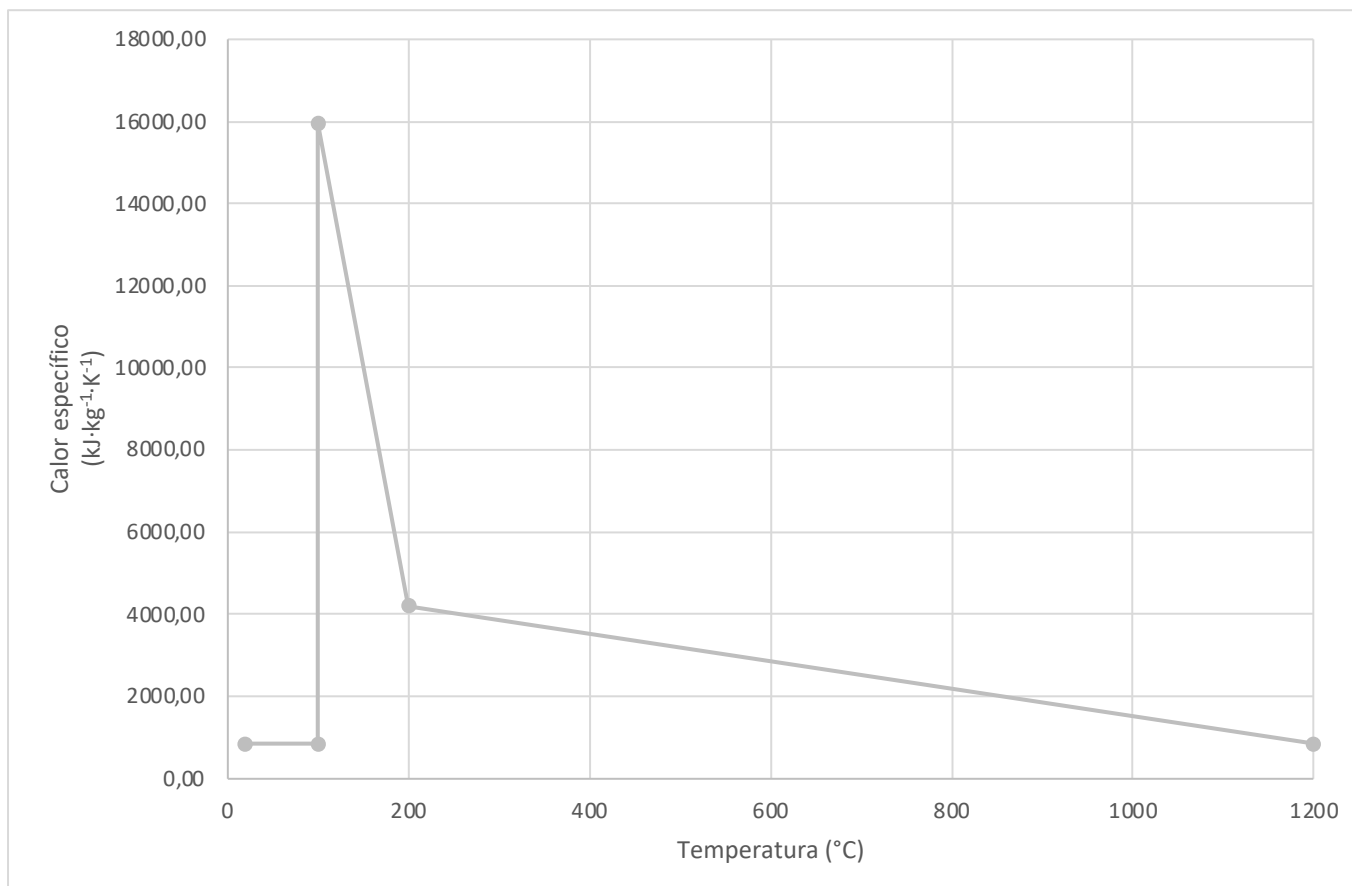


Figura 18. Valores de cálculo del calor específico de los ladrillos dependientes de la temperatura.

En cuanto a la conductividad térmica, las mismas referencias bibliográficas hacen referencia a un valor entre 0,38 y 0,54 W/m·K. Se decide, pues, conservar el valor propuesto por el Eurocódigo 6 (tabla 8 y figura 19).

Tabla 8. Valores de cálculo de la capacidad de conductividad térmica de los ladrillos dependientes de la temperatura.

Temperatura (°C)	Relación $\lambda_{p,T}/\lambda_{p,20^{\circ}\text{C}}$	Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
20	1	0,42
200	3	1,26
1200	3	1,26

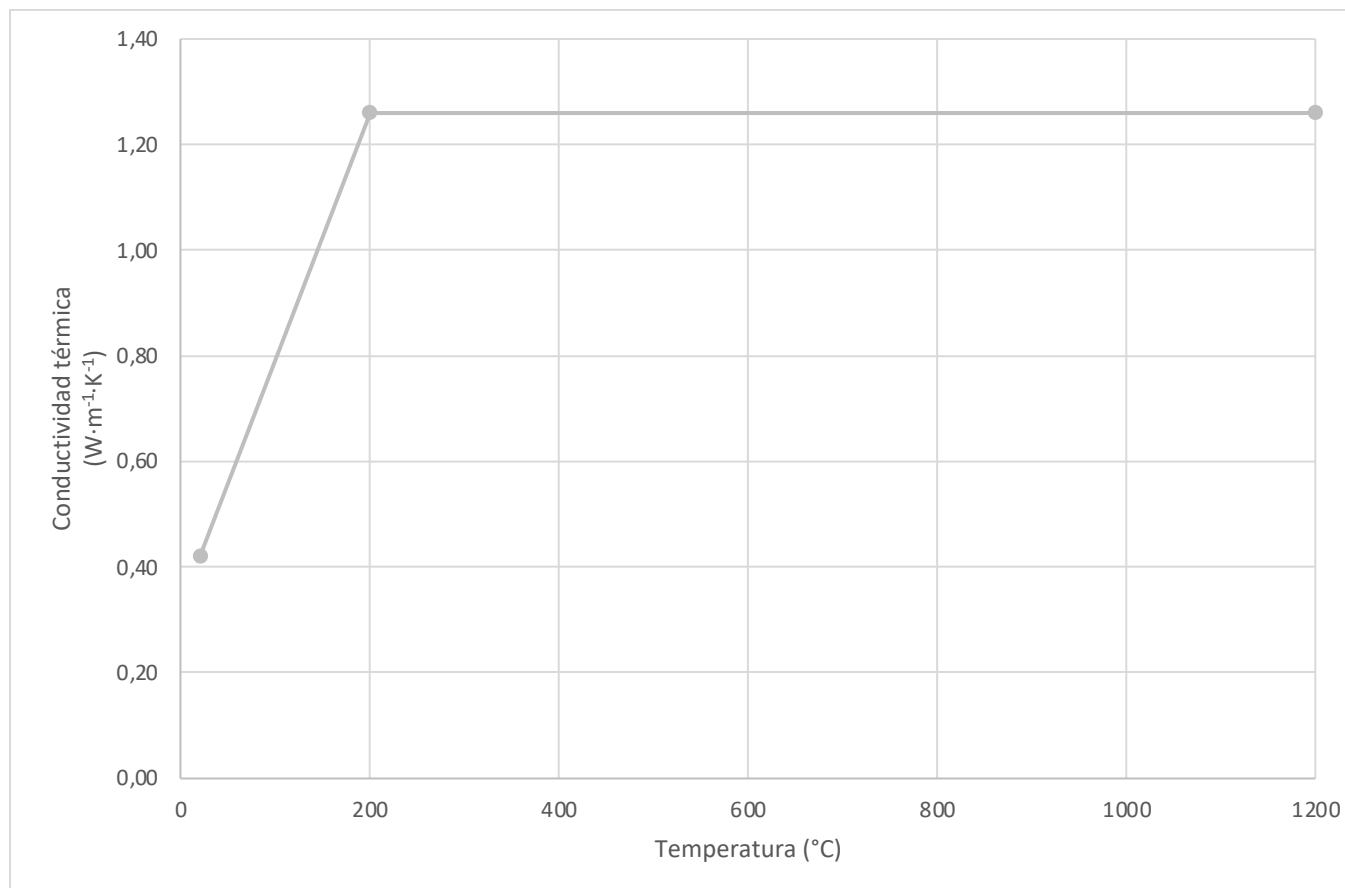


Figura 19. Valores de cálculo de la capacidad de conductividad térmica de los ladrillos dependientes de la temperatura.

3.3.2.3 MORTERO DE CAL HIDRÁULICA

Finalmente, las propiedades térmicas del mortero de cal hidráulica, empleado como relleno, se extraen del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [13]. En su apartado 3.5. Morteros, se indica que “para los morteros colocados ‘in situ’, conviene considerar una densidad de 1900 kg/m³”. De la tabla 9, resultan una conductividad térmica de 1,3 W/m·K y una capacidad de calor específico de 1000 J/kg·K.

Tabla 9. Propiedades del mortero de relleno.

Morteros				
Material	HE			
	ρ kg / m³	λ W / m·K	c_p J / kg·K	μ
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido ^{(1) (2)}	$\rho > 2000$	1,80	1000	10
	$1800 < \rho \leq 2000$	1,30	1000	10
	$1600 < \rho \leq 1800$	1,00	1000	10
	$1450 < \rho \leq 1600$	0,80	1000	10
	$1250 < \rho \leq 1450$	0,70	1000	10
	$1000 < \rho \leq 1250$	0,55	1000	10
	$750 < \rho \leq 1000$	0,40	1000	10
	$500 < \rho \leq 750$	0,30	1000	10
Mortero de áridos ligeros (vermiculita, perlita) ⁽²⁾	$\rho \leq 1000$	0,41	1000	10
Mortero de yeso	$\rho \leq 1600$	0,80	1000	6

⁽¹⁾ Para el mortero colocado “in situ” se considera una densidad de 1900 kg/m³

⁽²⁾ Los valores de diseño anotados corresponden a un percentil del 90% y provienen de los valores declarados obtenidos según la norma UNE EN 1745:2002 y corregidos según los criterios de la norma UNE EN 12524:2000, con factor de corrección de humedad, F_m, igual a 1,17.

Fuente: Catálogo de Elementos Constructivos del CTE.

3.3.2.4 OTROS MATERIALES

Se toma del mismo catálogo las propiedades térmicas de los otros materiales presentes en la envolvente de los locales:

- Baldosas cerámicas: $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 1,3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; $c_p = 840 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.
- Tabiquería (placas de yeso laminado): $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,25 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; $c_p = 100 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

3.3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

Al centrar el análisis en la resistencia al fuego de las viguetas de madera, elemento más desfavorable del forjado de revoltones de ladrillo, no se van a estudiar las propiedades mecánicas de los ladrillos y del mortero de cal.

Habitualmente, en el caso de la construcción de una estructura nueva, la resistencia característica de la madera aserrada se obtiene a partir del *Anejo C. Asignación de clase resistente. Madera aserrada* del Documento Básico – Seguridad Estructural – Madera (DB-SE-M) del CTE. Según el apartado C.2 de este documento, la especie Pino laricio puede ser de clase C18 o C30 en función de su calidad (tabla 10).

Tabla 10. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas y procedencias según normas de clasificación.

Norma	Especie (Procedencia)	Clase resistente									
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	D35	D40
UNE 56.544	Pino silvestre (España)	-	-	ME-2	-	-	ME-1	-	-	-	-
	Pino pinaster (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	
	Pino insignis (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	
	Pino laricio (España)	-	-	ME-2	-	-	-	ME-1	-	-	
NF B 52.001-4	Abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	
	Falso abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	
	Pino oregón (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	-	-	-	
	Pino pinaster (Francia)	-	-	ST-III	-	ST-II	-	-	-	-	
DIN 4074	Abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	
	Falso abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	
	Pino silvestre (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	
INSTA 142	Abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	
	Falso abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	
	Pino silvestre (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	
BS 4978	Abeto (Reino Unido)	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	
	Pino silvestre (Reino Unido)	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	
BS 5756	Iroko (África)	-	-	-	-	-	-	-	-	HS	
	Jarrah (Australia)	-	-	-	-	-	-	-	-	HS	
	Teca (África y Asia SE)	-	-	-	-	-	-	-	-	HS	

Fuente: Tabla C.1 del DB-SE-M del CTE

Los criterios de calidad (ME-1 y ME-2 en la tabla 10) se establecen en la norma UNE 56544:2011 dependen principalmente del diámetro de los nudos sobre el elemento observado, de la anchura máxima de su anillo de crecimiento, de la presencia de fendas, acebolladuras, gemas y alteraciones biológicas.

No obstante, al no encontrarse con un caso de ejecución de estructura nueva, sino de rehabilitación de estructura existente, la proposición de clase resistente del CTE no es de aplicación. Por tanto, se debe recurrir a la norma italiana UNI 11119:2004, ya que ninguna norma española establece los criterios de resistencia de la madera para proyectos de restauración de edificios. Además, no sería posible llevar a cabo una campaña de ensayos para determinar esta resistencia, al ser estos de tipo exclusivamente destructivo o semi-destructivo.

La UNI 11119:2004 distingue tres criterios de calidad para las inspecciones *in-situ*, basados en características similares a las de la UNE 56544:2011 (tablas 11 y 12).

Tabla 11. Reglas de clasificación para elementos estructurales de madera *in-situ*.

CARACTERÍSTICA	CATEGORIA IN OPERA		
	I	II	III
Smussi	$\leq 1/8$	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$
Lesioni varie, Cretti da gelo, Cipollature	assenti	assenti	ammissibili, se limitate
Nodi singoli	$\leq 1/5 \leq 50$ mm	$\leq 1/3 \leq 70$ mm	$\leq 1/2$
Gruppi di nodi	$\leq 2/5$	$\leq 2/3$	$\leq 3/4$
Inclinazione della fibratura (pendenza %)	in sez. radiale	$\leq 1/14$ ($\approx 7\%$)	$\leq 1/5$ ($\approx 20\%$)
	in sezione tangenziale	$\leq 1/10$ (10%)	$\leq 1/5$ (20%)
Fessurazioni radiali da ritiro	ammissibili, purché non passanti		

Fuente: Tabla 1 de la UNI 11119:2004

Tabla 12. Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b < 70$ mm.

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h)		$d \leq 1/5$ de "h"	$d \leq 1/2$ de "h"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b)		$d \leq 1/2$ de "b" y $d \leq 30$ mm	$d \leq 2/3$ de "b"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO ⁽¹⁾			
- Pino silvestre		≤ 4 mm	Sin limitación
- Pino laricio		≤ 5 mm	Sin limitación
- Pino gallego y pinaster		≤ 8 mm	Sin limitación
- Pino insigne (radiata)		≤ 10 mm	Sin limitación
		$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
FENDAS	De secado ^{(2) (3)}	Las fendas de secado sólo se consideran si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: 1/4 de la longitud de la pieza y 1 m.	
	- Rayo	No permitidas	
	- Heladura	No permitidas	
- Abatimiento		No permitidas	
ACEBOLLADURAS		No permitidas	
BOLSAS DE RESINA y ENTRECASCO		Se admiten si su longitud es menor o igual que $1,5 \cdot "h"$	
MADERA DE COMPRESIÓN		Admisible en 1/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en 2/5 de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACIÓN DE LA FIBRA		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
GEMAS			
- longitud		$\leq 1/4$ de "L"	$\leq 1/3$ de "L"
- dimensión relativa		$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
MÉDULA ⁽¹⁾		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
ALTERACIONES BIOLÓGICAS			
- Muérdago (<i>V. album</i>)		- No se admite	
- Azulado		- Se admite	
- Pudrición		- No se admite	
- Galerías de insectos xilófagos		- No se admiten	
DEFORMACIONES MÁXIMAS ^{(2) (3) (4)}			
- Curvatura de cara		10 mm (para una longitud de 2 m)	20 mm (para una longitud de 2 m)
- Curvatura de canto		8 mm (para una longitud de 2 m)	12 mm (para una longitud de 2 m)
- Alabeo		1 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)	2 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m)
- Abarquillado		sin limitación	
<p>(1) Estos criterios sólo se consideran cuando se comercializa en húmedo. (2) Estos criterios no se consideran cuando la clasificación se efectúa en húmedo. (3) Refiridas a un 20% de contenido de humedad. (4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase del montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.</p>			

Fuente: Tabla 2 de la UNE 56544:2011.

Una vez conocida la categoría de calidad de la madera, se obtienen de la tabla 3 de la UNI 1119:2004, las propiedades mecánicas del material (tabla 13).

Tabla 13. Tensiones máximas para la aplicación del método de tensiones admisibles y módulos medios de elasticidad en flexión, para las categorías in situ de las principales especies de madera, aplicables para una humedad de la madera = 12%.

Specie	Categoría in opera	Tensioni massime (N/mm ²)					
		compressione		flessione statica	trazione parallela alla fibratura ¹⁾	taglio (parallelo alla fibratura)	modulo di elasticità a flessione
		parallela alla fibratura	perpendicolare alla fibratura				
Abete bianco (Abies alba Mill.)	I	11	2,0	11,5	11	0,9	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,8	12 000
	III	7	2,0	7,5	6	0,7	11 000
Abete rosso (Picea abies Karst.)	I	10	2,0	11	11	1,0	12 500
	II	8	2,0	9	9	0,9	11 500
	III	6	2,0	7	6	0,8	10 500
Larice (Larix spp.)	I	12	2,5	13	12	1,1	15 500
	II	10	2,2	11	9,5	1,0	14 500
	III	7,5	2,0	8,5	7	0,9	13 500
Pini (Pinus spp.)	I	11	2,0	12	11	1,0	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,9	12 000
	III	7	2,0	8	6	0,8	11 000
Castagno (Castanea sativa Mill.)	I	11	2,0	12	11	0,8	10 000
	II	9	2,0	10	9	0,7	9 000
	III	7	2,0	8	6	0,6	8 000
Pioppo (Populus spp.)	I	10	1,5	10,5	9	0,6	9 000
	II	8	1,5	8,5	7	0,5	8 000
	III	6	1,5	6,5	4,5	0,4	7 000
Quercia (Quercus spp.)	I	12	3,0	13	12	1,2	13 500
	II	10	2,5	11	10	1,0	12 500
	III	7,5	2,2	8,5	7	0,9	11 500

1) La tensione massima a trazione perpendicolare alla fibratura si assume convenzionalmente uguale a zero.

Fuente: Tabla 3 de la UNI 1119:2004.

Al no tener información sobre el estado de la madera del forjado estudiado, y con el fin de no alejarse mucho de las pésimas propiedades mecánicas propuestas por el CTE DB-SE-M, se considera que los elementos son de categoría I. Por tanto, se consigue una resistencia característica a flexión de 12 MPa y un módulo de elasticidad a flexión de 13000 MPa. Finalmente, se considera que el coeficiente de Poisson de la madera es de 0,3.

Cabe destacar que los valores obtenidos no son los valores de cálculo empleados en los modelos mecánicos. Dichos valores de cálculo se obtendrán en los apartados correspondientes : 4.3.1.1 para los métodos simplificados y 4.3.2 para los modelos avanzados.

4 OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA AL FUEGO DE LOS FORJADOS

4.1 MODELOS DE FUEGO

4.1.1 BASES TEÓRICAS DE LOS INCENDIOS

4.1.1.1 DINÁMICA DE FORMACIÓN Y DESARROLLO DE UN INCENDIO

Para poder adoptar medidas de protección contra incendios en los edificios, es esencial conocer con mayor precisión la dinámica de un incendio, es decir, las diferentes fases de su desarrollo (fig. 20).

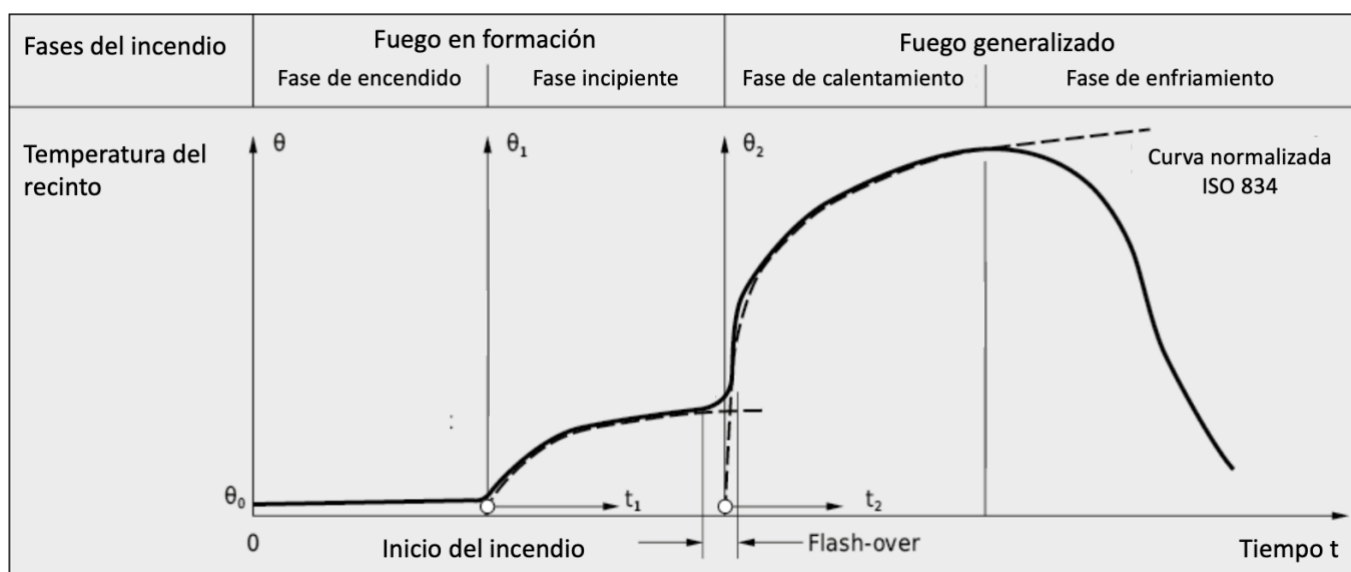


Figura 20. Desarrollo de un incendio natural

Fuente: [14]

Fuego en formación

Cuando los materiales se calientan hasta la temperatura de ignición, el fuego latente pasa a ser un fuego ardiente. Un fuego localizado con apariencia de llamas se denomina fuego en formación. Se distinguen dos comportamientos distintos para la formación del fuego : fuego incipiente y explosión de humo.

- (1) Fuego incipiente : el fuego se desarrolla más o menos rápidamente en función del tipo e intensidad de la fuente de ignición y de los materiales combustibles implicados. En la mayoría de los casos, el fuego se propaga inicialmente de forma relativamente lenta en las proximidades de los materiales combustibles. Algunos de los puntos incandescentes permanecen casi invisibles. Cuando se trata de cantidades mayores de materiales combustibles, la cantidad de calor liberado y la temperatura aumentan casi exponencialmente.
- (2) Explosión de humo : en casos desfavorables, puede formarse una mezcla explosiva entre el aire y los gases, vapores o polvos combustibles. En cuanto se alcanza la temperatura de ignición, ésta se produce en fracciones de segundo.

Flash-over

Cuando, durante la formación del incendio, la producción de energía alcanza cierto nivel, comparado con la masa combustible, la temperatura aumenta bruscamente. Esto conduce a una gasificación masiva de las sustancias combustibles con una elevada producción de llamas. El fuego en formación se convierte entonces en un incendio generalizado. Hasta el instante en el que se produce el flash-over, se puede contener el fuego mediante medios de extinción. En caso de producirse el flash-over, el siniestro es inevitable.

Incendio generalizado

Existen dos mecanismos de alimentación de un incendio generalizado :

- (1) Incendio alimentado por materiales: Cuando se dispone de suficiente oxígeno, la evolución del fuego depende de la cantidad y disposición de los materiales combustibles. Cada vez se incendia más material y aumentan tanto la cantidad de calor como la temperatura. A medida que el suministro de combustible se agota, la potencia del fuego disminuye gradualmente hasta que el material combustible se consume en su mayor parte.
- (2) Incendio alimentado por aire: Si el suministro de aire es limitado, puede producirse una falta de oxígeno después de algún tiempo. El desarrollo del incendio se retrasa entonces y el fuego acaba por apagarse. Un suministro repentino de aire, por ejemplo, abriendo o destruyendo ventanas o puertas, reavivará el fuego.

4.1.1.2 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL CALOR

Existen tres mecanismos de transmisión de calor : la conducción, la convección y la radiación (fig. 21).

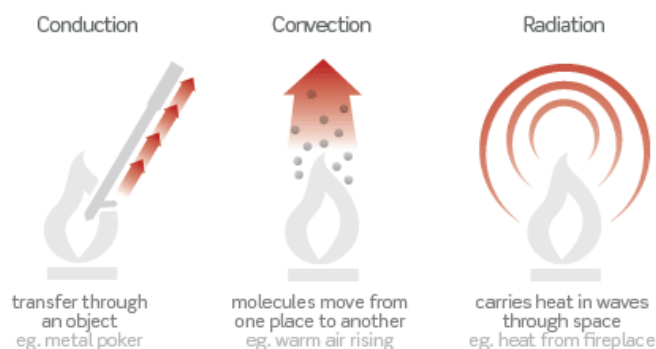


Figura 21. Mecanismos de transferencia de calor.

Fuente: [9]

Mecanismo de conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor dentro de un medio sólido sin desplazamiento de materia, bajo la influencia de un gradiente de temperatura. La propagación del calor por conducción en el interior de un cuerpo se realiza según dos mecanismos distintos: una transmisión por las vibraciones de los átomos o moléculas y una transmisión por los electrones libres.

La ley que rige este mecanismo es la ley de Fourier, cuya formulación es la siguiente:

$$\Phi_{\text{cond}} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

Con:

- Φ_{cond} : flujo de calor por conducción ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$);
- λ : conductividad térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);
- $\frac{dT}{dx}$: gradiente del campo de temperatura en el interior del medio sólido ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$).

Mecanismo de convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que se produce entre un sólido y un fluido: la energía se transmite por desplazamiento del fluido. Lo rige la ley de Newton:

$$\Phi_{\text{conv}} = \alpha_c \cdot (T_p - T_{\infty})$$

Con:

- Φ_{conv} : flujo de calor por convección ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$);
- α_c : coeficiente de convección ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$);
- T_p : temperatura de la superficie del cuerpo sólido (K ó °C);
- T_{∞} : temperatura del fluido lejos del cuerpo sólido (K ó °C).

Mecanismo de radiación

La radiación es un mecanismo de transferencia de energía electromagnética entre dos superficies. Es el único que se puede producir sin presencia de materia, es decir en el vacío. Lo rige la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\Phi_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_{\infty}^4)$$

Con:

- Φ_{rad} : flujo de calor emitido por radiación ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$);
- ε : emisividad del material de la superficie que emite el flujo;
- σ : constante de Stefan ($5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$);
- T_p : temperatura de la superficie del cuerpo que emite el flujo (K ó °C);
- T_{∞} : temperatura del ambiente del cuerpo sólido (K ó °C).

4.1.2 FUEGO NORMATIVO ISO 834

Para el análisis térmico de los elementos estructurales, la UNE-EN 1991-1-2 propone utilizar diferentes modelos de fuego. Los primeros de ellos son las curvas nominales tiempo-temperatura : curva normalizada tiempo-temperatura, curva de fuego exterior y curva de hidrocarburos. En el caso del estudio de elementos estructurales interiores, conviene emplear la curva normalizada tiempo-temperatura ISO 834.

Según el apartado 3.2.1. *Curva normalizada tiempo-temperatura* de la norma, la ecuación de la curva de fuego es:

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

Con:

- θ_g : Temperatura del gas en el sector de incendio (°C);
- t : tiempo (min).

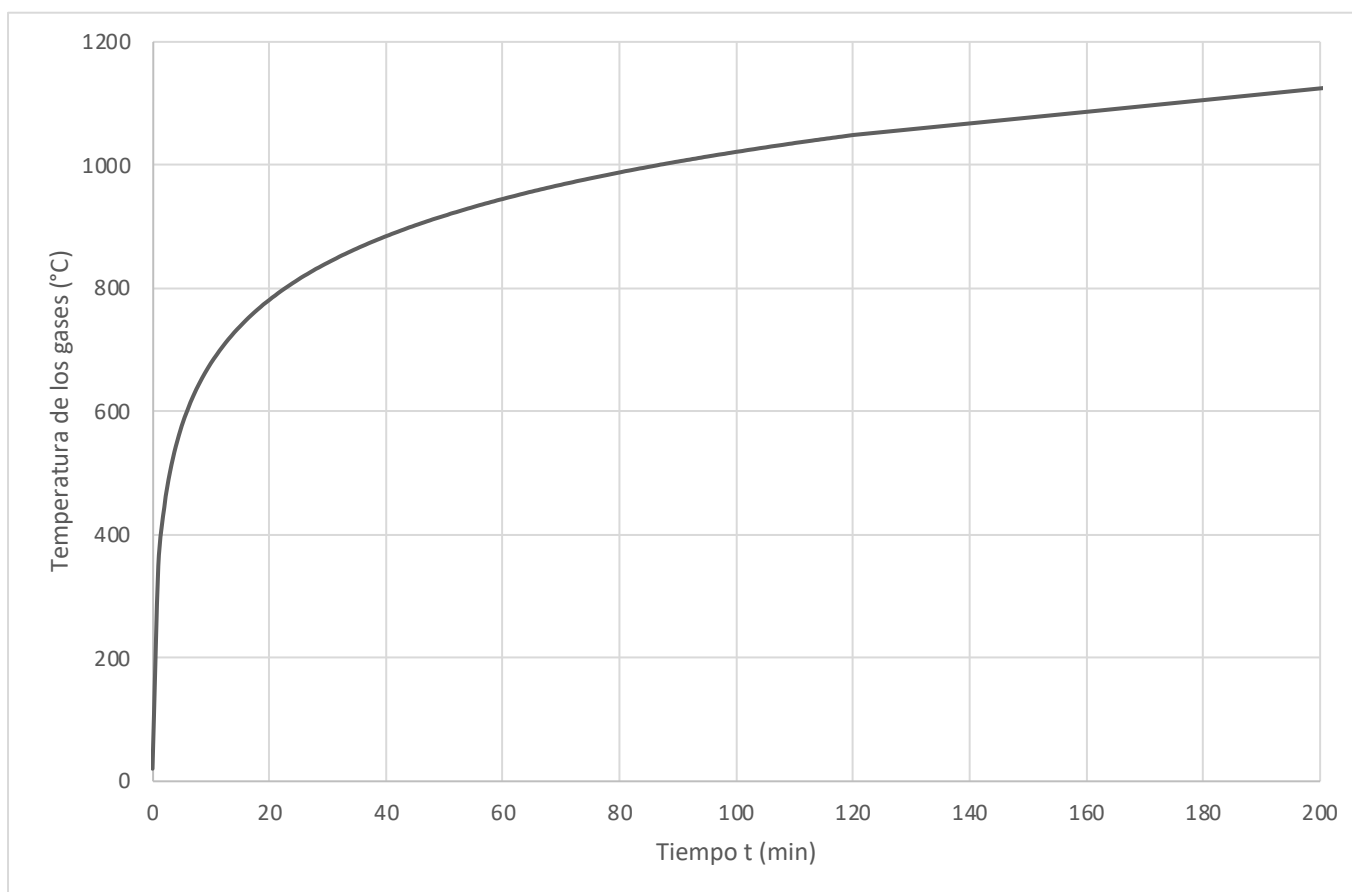


Figura 22. Curva normalizada tiempo-temperatura.

El coeficiente de transferencia de calor por convección asociado a este modelo de fuego es de $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tal y como se puede apreciar en la figura 22, la curva estándar corresponde a un modelo de fuego generalizado, prescindiendo de la fase de formación del fuego.

Por otra parte, la definición matemática de esta curva no considera las condiciones reales del recinto en el que se produce el incendio. Así, las temperaturas de la fase de calentamiento pueden verse inferiores a las del incendio real y, como no se puede definir la duración de la fase de calentamiento sin conocer las características del local, no se considera tampoco la fase de enfriamiento del incendio.

Por tanto, conviene estudiar modelos de fuego natural como pueden ser los fuegos paramétricos que se detallan a continuación.

No obstante, sigue siendo interesante el uso de la curva normalizada ya que tiene una dimensión universal para realizar comparaciones de resultados y, al tender la temperatura al infinito, se supone que el fallo se va a producir siempre. Así, la clasificación de la resistencia al fuego de los productos de la construcción se realiza a partir de la curva ISO 834 para tener una referencia única.

4.1.3 FUEGOS PARAMÉTRICOS

El segundo tipo de modelos de fuego contemplados por la UNE-EN 1991-1-2 son los modelos de fuego natural. Entre ellos, se distinguen dos subgrupos : los modelos de fuego simplificados y los modelos de fuego avanzados.

Los modelos de fuego natural simplificados deben tener en cuenta la densidad de carga de fuego y las condiciones de ventilación del recinto estudiado (apartado 3.3.1.2 de la norma). Se denomina carga de fuego la “suma de las energías caloríficas que se liberan en la combustión de todos los materiales combustibles existentes en un espacio”. Dependen, pues, de los elementos constructivos y de los elementos contenidos en el edificio.

En cuanto a los modelos de fuego natural avanzados, la norma establece que deben considerar las propiedades del gas, el intercambio de masa y el intercambio de energía. Pertenecen a este grupo los modelos de zona (de una zona o de dos zonas) y los modelos informáticos de dinámica de fluidos.

Para ambos tipos de modelo de fuego, el coeficiente de transferencia de calor por convección a emplear es de $35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Al pertenecer al grupo de modelos de fuego natural simplificados, la obtención de las curvas paramétricas tiempo-temperatura requieren definir las hipótesis de ventilación de los tres recintos estudiados.

4.1.3.1 HIPÓTESIS DE VENTILACIÓN

El local A, dormitorio sencillo de 7 m², presenta una puerta y una ventana. A partir de esta configuración, se pueden distinguir 4 hipótesis de ventilación diferentes (tabla 14).

Tabla 14. Hipótesis de ventilación del local A.

Nº Hipótesis	Puerta	Puerta-ventana
1	Abierta	Abierta
2	Cerrada	Abierta
3	Cerrada	Cerrada
4	Abierta	Cerrada

Según el estudio realizado en [15], las hipótesis 3 y 4 no son relevantes en el análisis térmico y pueden ser descartadas. De hecho, al considerar la puerta y la ventana cerradas en la hipótesis 3, el oxígeno se consume rápidamente al principio del incendio y, por tanto, el fuego no se desarrolla completamente. Además, las curvas paramétricas son de aplicación cuando el factor de apertura está en el rango [0,02;0,2] m^{1/2}. Al tener un factor de apertura de 0, no se puede aplicar los modelos de curvas paramétricas a este escenario.

En cuanto a la hipótesis 4, al alcanzar cierta temperatura de gases en el interior del recinto, las ventanas estallarían, produciéndose alrededor de los 320°C, y la configuración de ventilación sería similar a la de la hipótesis 1.

De manera análoga, se obtienen las hipótesis de ventilación para los locales B y C (tablas 15 y 16)..

Tabla 15. Hipótesis de ventilación del local B.

Nº Hipótesis	Puerta	Puerta corredora	Ventana
1	Abierta	Abierta	Abierta
2	Cerrada	Cerrada	Abierta
3	Abierta	Cerrada	Abierta
4	Cerrada	Abierta	Abierta

Tabla 16. Hipótesis de ventilación del local C.

Nº Hipótesis	Puerta	Puerta corredora cocina	Puerta corredora despacho	Puertas-ventanas
1	Abierta	Abierta	Abierta	Abiertas
2	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Abiertas
3	Abierta	Cerrada	Cerrada	Abiertas
4	Abierta	Cerrada	Abierta	Abiertas
5	Cerrada	Abierta	Abierta	Abiertas
6	Cerrada	Cerrada	Abierta	Abiertas

4.1.3.2 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS PARAMÉTRICAS

El cálculo de las ecuaciones de las curvas paramétricas se realiza siguiendo las instrucciones del anexo A de la UNE-EN 1991-1-2:2019.

Su aplicación es válida para recintos totalmente cubiertos (sin ventana en el techo) de menos de 500 m² y 4 m de altura. Se asume además la combustión completa de toda la carga de fuego.

La ecuación general de las curvas durante la fase de calentamiento es :

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*})$$

Donde:

- θ_g : temperatura del aire en el sector de incendio (°C);
- $t^* = t \cdot \Gamma$ con
 - o t : tiempo (h)
 - o $\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2$
 - o B : coeficiente

Tal y como se ha anticipado anteriormente, las curvas paramétricas dependen, pues, de las hipótesis de ventilación (a través del coeficiente de aperturas O) y de las propiedades térmicas de los materiales de la envolvente (coeficiente b), variables en función del local estudiado. También dependen de la densidad de carga de fuego, única para todo el edificio..

Cálculo de la densidad de carga de fuego

Según el párrafo (7) del anexo A de la UNE-EN 1991-1-2:2019, el valor de cálculo de la densidad de carga de fuego tiene por expresión:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t$$

A partir del Anexo E de la misma norma, se obtiene la expresión siguiente:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

Donde:

- $q_{f,k}$ es la densidad de carga de fuego característica por unidad de superficie de suelo, igual a 948 MJ/m² en el presente caso (tabla 17).

Tabla 17. Densidades de carga de fuego para diferentes actividades.

Actividad	Media	Fractil 80%
Vivienda	780	948
Hospital (habitación)	230	280
Hotel (habitación)	310	377
Biblioteca	1 500	1 824
Oficina	420	511
Aula de escuela	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cine)	300	365
Transporte (espacio público)	100	122
NOTA Para el fractil 80% se supone aplicada la ley de Gumbel.		

Fuente: Tabla E.4 de la UNE-EN 1991-1-2:2019

- δ_{q1} es un coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de inicio del incendio debido al tamaño del sector. En [16] se propone la siguiente relación para sectores de superficie A que no sea en la tabla 18:

$$\delta_{q1} = 0,1688 \cdot \ln A + 0,5752$$

Resultan los siguientes valores respectivos para los locales A, B y C: 0,90; 1,04 y 1,12.

- δ_{q2} es un coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de inicio del incendio debido al tipo de actividad.

Tabla 18. Coeficientes δ_{q1} , δ_{q2} .

Superficie de suelo del sector A_f [m²]	Riesgo de inicio del incendio δ_{q1}	Riesgo de inicio del incendio δ_{q2}	Ejemplos de tipos de actividad
25	1,10	0,78	galería de arte, museo, piscina
250	1,50	1,00	oficina, residencia, hotel, industria papelera
2 500	1,90	1,22	fábrica de maquinaria y de motores
5 000	2,00	1,44	laboratorio químico, taller de pintura
10 000	2,13	1,66	fábrica de fuegos artificiales o de pinturas

Fuente: Tabla E.1 de la UNE-EN 1991-1-2:2019

- m es el coeficiente de combustión, igual a 0,8 (apartado E.3 de la norma)
- δ_n es un coeficiente que tiene en cuenta las diferentes medidas de lucha contra el incendio, igual a 0,78 considerando únicamente la intervención de bomberos ajenos.

Del cálculo anterior, resultan los valores de cálculo de la densidad de carga de fuego tabulados en la tabla 19.

Tabla 19. Valores de cálculo de la densidad de carga.

Recinto	$q_{f,d}$ (MJ·m ⁻²)
A	534,6
B	617,1
C	661,7

A continuación, se expone el procedimiento de cálculo de la curva paramétrica para el local A en la hipótesis de ventilación 1. Los cálculos para los otros locales y otras hipótesis de ventilación se exponen en el Anejo 1.

Cálculo de la ecuación de la curva en fase de calentamiento

Tabla 20. Coeficientes b de los materiales de la envolvente de los locales.

	Ladrillo	Yeso	Baldosas cerámicas	Madera	Mortero de cal
Densidad ρ (kg/m ³)	1800	800	2300	575	1900
Calor específico c (J/kg·K)	840	1000	840	1530	1000
Conductividad térmica λ (W/m·K)	0,42	0,25	1,3	0,12	1,3
Coeficiente b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	796,89	447,21	1584,80	324,92	1571,62

Al tratarse de cerramientos heterogéneos en espesor, tal y como es el caso de los forjados y muros, la norma UNE-EN 1991-1-2, en el Anexo A, propone la formulación para el tratamiento de cerramientos multicapa, distinguiendo dos casos: (1) la capa directamente expuesta al fuego presenta un coeficiente b más bajo que las demás capas, (2) la capa directamente expuesta al fuego tiene un coeficiente b más elevado. En este caso, las caras directamente expuestas son todas de menor coeficiente b , entonces el coeficiente a considerar es directamente el del material expuesto al fuego.

Para el forjado, el coeficiente b se calcula atribuyendo un ancho tributario a la madera ($15/70 = 21,4\%$) y a los ladrillos ($55/70 = 78,6\%$).

Las características de la envolvente del local A se recopilan en la tabla 21.

Tabla 21. Características de la envolvente del local A.

Elemento envolvente	Envolvente			Aberturas					A _j m ²
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura m	Ancho m	Área m ²	Abierto Cerrado	
Suelo	Suelo	1584,80	7,0	-			0,00		7,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	7,7	-			0,00		7,72
Pared 2	Muro interior	447,21	8,4	Puerta	2,15	0,83	1,77	Abt	6,62
Pared 3	Muro interior	447,21	8,5	-			0,00		8,53
Pared 4	Muro exterior	447,21	8,4	Puerta-ventana	2,25	1,06	2,39	Abt	5,97
Forjado	Forjado	695,76	7,0	-			0,00		7,00

A partir de los resultados de la tabla 21, se pueden obtener los principales parámetros de la curva:

- $A_t = \sum A = 7,0 + 7,7 + 8,4 + 8,5 + 8,4 + 7,0 = 47,0 \text{ m}^2$
- $A_v = \sum A_{\text{aberturas}} = 1,77 + 2,39 = 4,16 \text{ m}^2$
- $b = \frac{\sum b_j \cdot A_j}{A_t - A_v} = 673,78 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$
- $h_{eq} = \frac{\sum h_{\text{aberturas}} \cdot A_{\text{aberturas}}}{A_v} = 2,21 \text{ m}$
- $O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{4,16 \cdot \sqrt{2,21}}{47} = 0,131 \text{ m}^{1/2}$

Cabe destacar que los coeficientes O y b respetan los límites fijados por la norma:

- $b \in [100; 2200] \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1}$;
- $O \in [0,02; 0,2] \text{ m}^{1/2}$.

Se obtiene así el factor tiempo:

$$\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2$$

$$\Gamma = (0,131/673,78)^2 / (0,04/1160)^2$$

$$\Gamma = 32,02$$

Luego, se calcula el instante de máxima temperatura en la fase de calentamiento:

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \text{ y } t_{max} = \max\{0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O; t_{lim}\}$$

Para fuegos de desarrollo medio, como es el caso para viviendas, $t_{lim} = 20 \text{ min}$ (tabla E.5 de la UNE-EN 1991-1-2:2019).

$$t_{max} = \begin{cases} 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t} = 7,3min \\ 20 min \\ t_{max} = 20 min \end{cases}$$

Obtener un valor $t_{max} = t_{lim}$ significa que el fuego está controlado por el combustible. La fase de calentamiento se acaba cuando el combustible se agota naturalmente. En este caso, la variable t^* se iguala a $t \cdot \Gamma_{lim}$, donde $\Gamma_{lim} = (O_{lim}/b)^2 / (0,04/1160)^2$ y $O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{lim}$.

Para el caso particular del local A en la hipótesis A1 (caso A1 a continuación), se obtiene $O_{lim} = 0,024 m^{1/2}$ y $\Gamma_{lim} = 1,06$.

Entonces, se obtiene:

$$\begin{aligned} t_{max}^* &= t_{max} \cdot \Gamma_{lim} \\ t_{max}^* &= \frac{1}{3} \cdot 1,06 \\ t_{max}^* &= 0,3523 h = 21 \text{ min } 8 \text{ s} \end{aligned}$$

La temperatura máxima asociada a este tiempo es $\Theta_{max} = 795,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Finalmente, la ecuación de la curva paramétrica A1 en fase de calentamiento es:

$$\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,212 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-1,802 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-20,14 \cdot t})$$

Cálculo de los parámetros de las curvas en fase de enfriamiento

Las curvas tiempo-temperatura en fase de enfriamiento vienen dadas por:

- $\Theta_g = \Theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x)$ para $t_{max}^* \leq 0,5$;
- $\Theta_g = \Theta_{max} - 250 \cdot (3 - t_{max}^*) \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x)$ para $0,5 < t_{max}^* < 2$;
- $\Theta_g = \Theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x)$ para $t_{max}^* \geq 2$.

Donde :

- $t_{max}^* = \left(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O}\right) \cdot \Gamma$
- $x = 1,0$ si $t_{max} > t_{lim}$, o bien $x = t_{lim} \cdot \frac{\Gamma}{t_{max}^*}$ si $t_{max} = t_{lim}$

Para la curva A1, se obtienen $t_{max}^* = 3,878$ y $x = 2,752$.

La ecuación de la curva paramétrica en la fase de enfriamiento correspondiente es:

$$\theta_g = 795,6 - 250 \cdot (1,06 \cdot t - 10,67)$$

Se representa la curva en la figura 23.

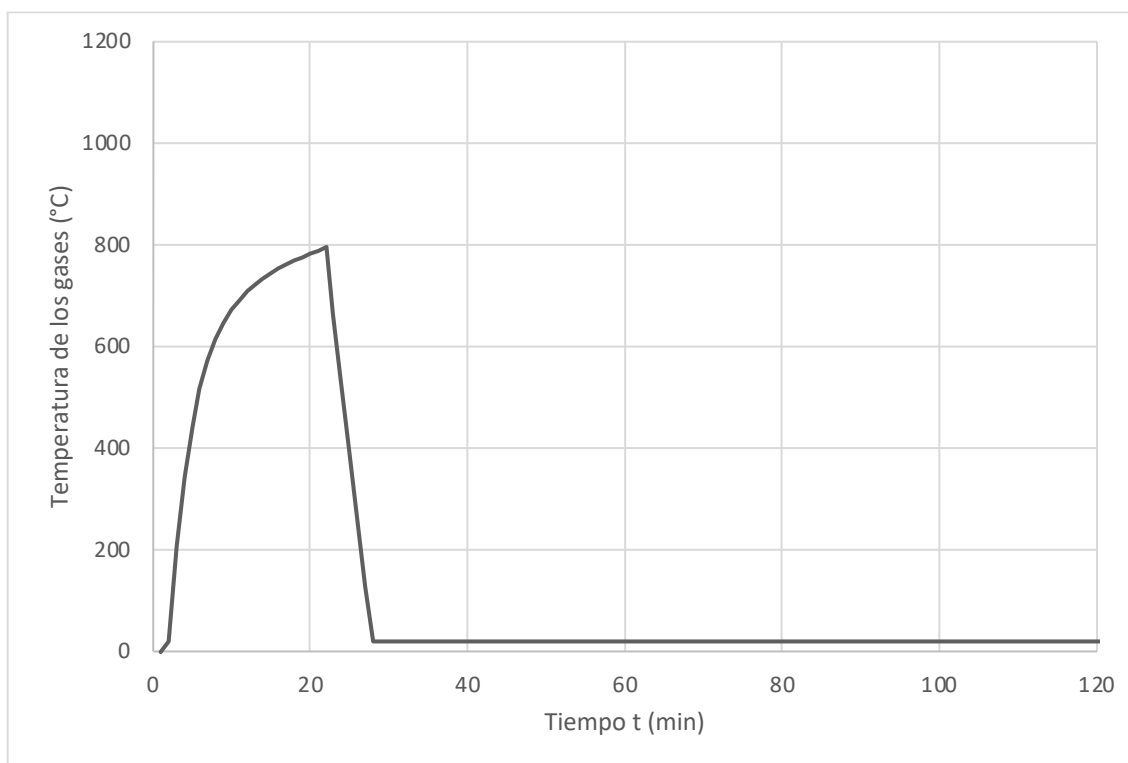


Figura 23. Curva tiempo-temperatura paramétrica para la hipótesis A1.

4.1.3.3 CURVAS PARAMÉTRICAS OBTENIDAS

A continuación, se muestran las curvas paramétricas para cada uno de los recintos (figuras 24 a 26).

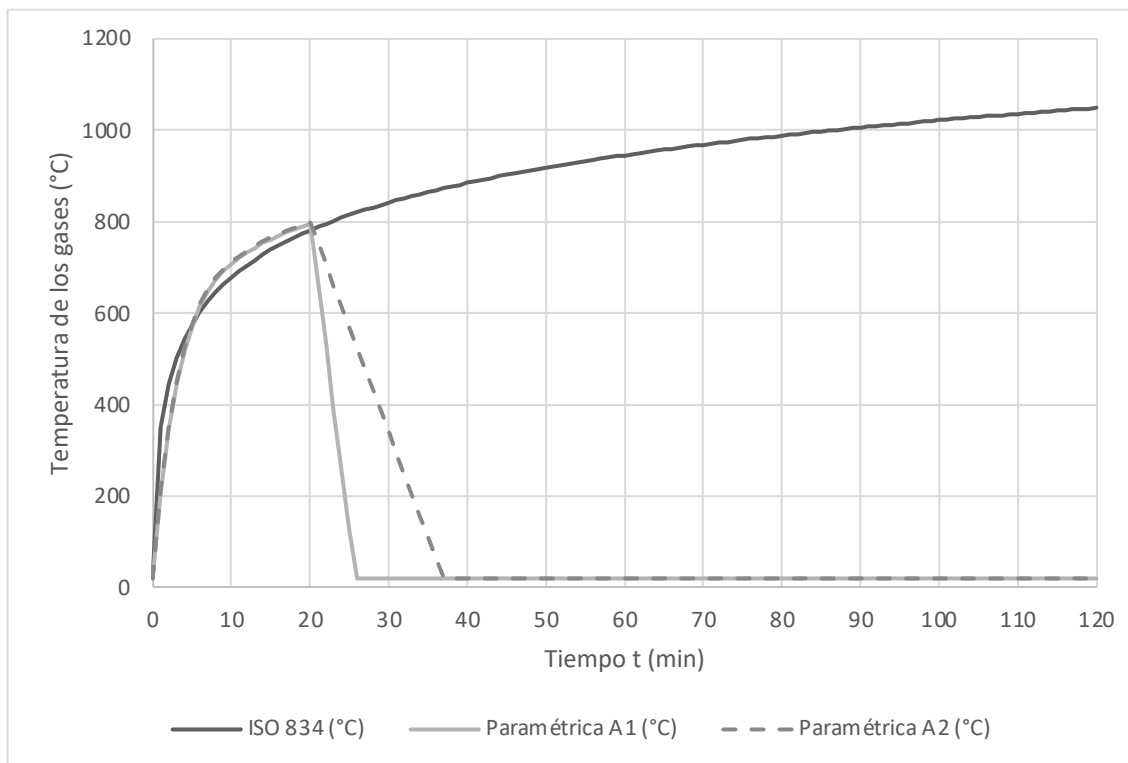


Figura 24. Curvas de fuego para el local A.

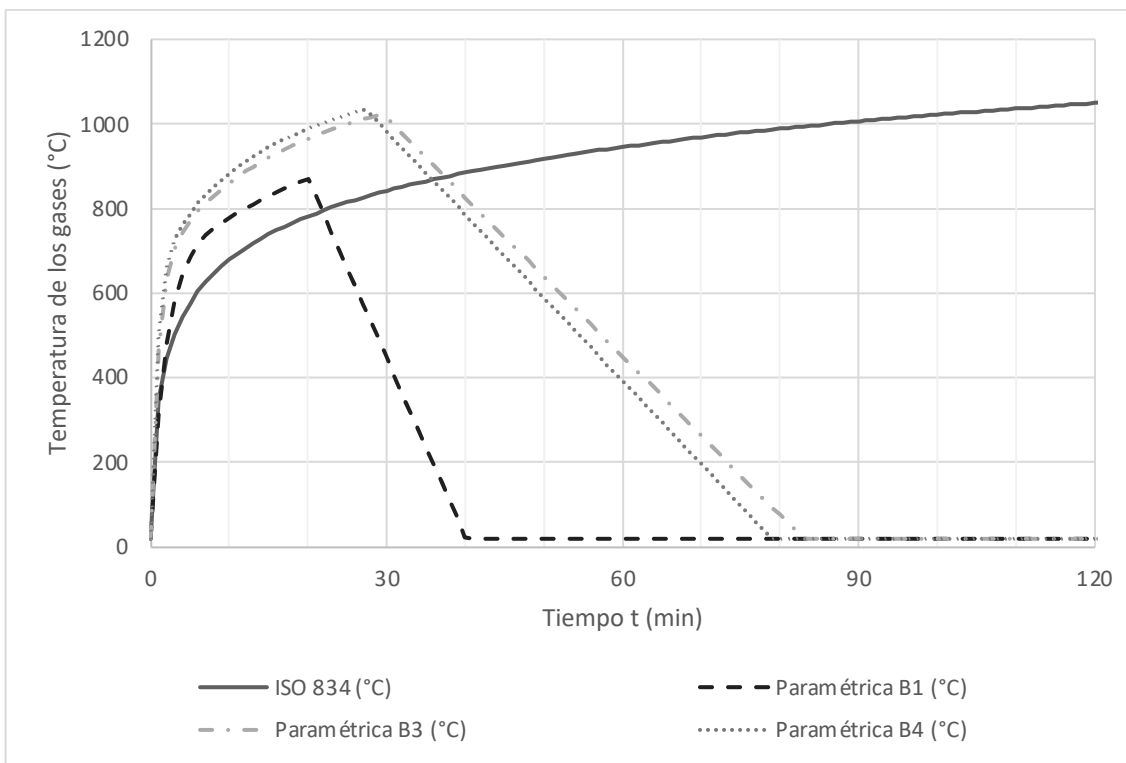


Figura 25. Curvas de fuego para el local B.

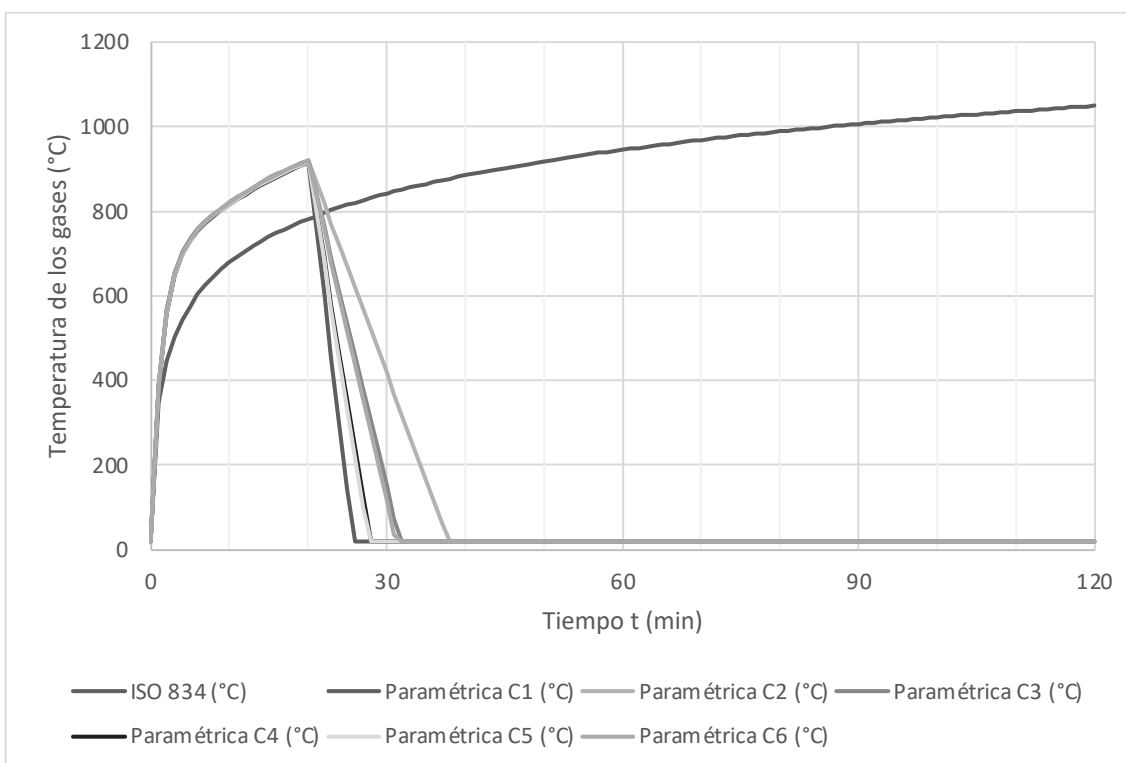


Figura 26. Curvas de fuego para el local C.

Cabe señalar que, en la figura 25, no se muestra la curva asociada a la hipótesis 2 del local B. En efecto, al calcular el coeficiente de apertura O para esta hipótesis, se ha obtenido un valor de 0,015, inferior al mínimo establecido por la norma. Entonces, este escenario de fuego queda fuera del marco establecido para el uso de las curvas

paramétricas. Como consecuencia de este coeficiente de apertura, la curva tiempo-temperatura B2 se sitúa por debajo de la curva normalizada ISO 834, tal y como se puede ver en la figura 27. Por tanto, los resultados de los análisis térmicos y mecánicos considerando el modelo de fuego B2 quedarían favorables en comparación con los obtenidos por la curva ISO 834.

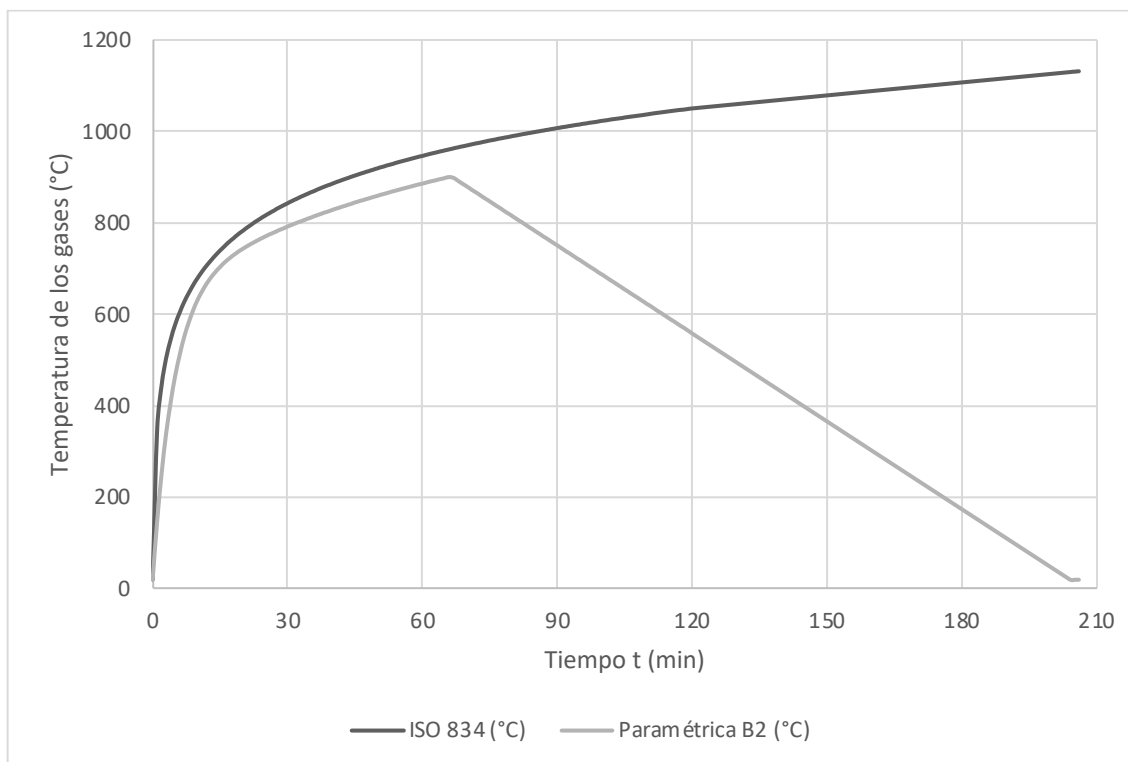


Figura 27. Comparación entre la curva normalizada ISO 834 y la curva paramétrica B2.

Por otra parte, para los locales A y C, todas las curvas alcanzan su máximo en el instante $t = 20 \text{ min}$, significando que el fuego está controlado por el combustible. Al contrario, para el local B, la hipótesis 1 es la única que representa un incendio controlado por el combustible, razón por la que los escenarios 3 y 4 tienen una temperatura máxima muy elevada respecto a las otras curvas.

A la vista de las curvas, se decide llevar a cabo los cálculos térmicos y mecánicos a partir de las 2 hipótesis para el local A; las hipótesis 1 y 4 para el local B ya que los escenarios 3 y 4 son similares pero la B4 indica una temperatura máxima mayor; las hipótesis 1 y 2 para el local C al ser las envolventes de todas las curvas en este local; y, evidentemente, la curva ISO-834 para los 3 recintos, con el fin de obtener una comparación de resultados en función de la luz de las viguetas.

4.2 MODELOS TÉRMICOS

Para llevar a cabo el análisis térmico, se ha empleado el programa SAFIR, desarrollado por profesores de la Universidad de Liège (Bélgica). Es un software de cálculo de estructuras sometidas a acciones de fuego, basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF), que permite analizar elementos en el plano o en el espacio.

El procedimiento de cálculo 2D realizado por SAFIR es el siguiente [16] :

- Se introduce el ataque térmico del fuego como condiciones iniciales del problema térmico;
- El programa calcula el campo de temperaturas en el elemento a lo largo del tiempo, utilizando elementos finitos triangulares, rectangulares o prismáticos (de 6 a 8 nodos). El programa tiene implementado una lista de materiales con sus propiedades térmicas y deja el usuario introducir su propio material.
- A partir del campo de temperatura y de las propiedades mecánicas implementadas en la biblioteca de materiales, el software calcula la respuesta mecánica del elemento, proporcionando los desplazamientos en los nodos, las reacciones en los apoyos y las tensiones en la sección transversal.

La tabla 22 lista los materiales disponibles en SAFIR según el análisis que se quiera llevar a cabo.

Tabla 22. Materiales disponibles en SAFIR.

Type of FE	THERMAL ANALYSIS		STRUCTURAL ANALYSIS		
	2D Solid	3D Solid	Beam Truss	Shell	3D Solid
Type of law			Uniaxial	Plane stress	Triaxial
Mapped with	Beam Shell	3D Solid			
Material:					
Steel	X	X	X	X	X
Concrete	X	X	X	X	X
Wood	X	X	X		
HSC	X	X	X		
Stainless steel	X	X	X		
Aluminum	X	X	X		
Gypsum	X	X			
Insulation	X	X			
User	X	X			
User_Steel			X		

Fuente: [16]

Tal y como se ha comentado, se puede observar que el software ofrece al usuario la posibilidad de introducir un material en el análisis térmico a partir de un archivo de texto pero no en el análisis mecánico. Esto es debido a

que los modelos mecánicos están basados en los Eurocódigos correspondientes y crear un nuevo material requeriría modificaciones más avanzadas en el código del programa.

Por otra parte, el inconveniente de SAFIR es que no dispone de una interfaz visual y la introducción de datos se realiza directamente en archivos de texto (formato .in). Con el fin de simplificar la entrada de los datos, la definición de las condiciones iniciales del problema se pueden hacer mediante el preprocesador GiD que propone una interfaz similar a los programas comerciales de CAD. Luego, la visualización de los resultados de los análisis térmicos y mecánicos (archivos .tem, .out y .xml) se puede realizar en los postprocesadores GiD y Diamond. Se recomienda el uso del segundo de ellos, desarrollado también por la Universidad de Liège.

Concretamente, para el presente estudio, se ha importado la sección transversal del forjado en GiD a partir de un archivo generado en AutoCAD. A partir de las líneas del contorno identificadas por el programa, se han creado las superficies asociadas. El siguiente paso consiste en atribuir un material a cada superficie. Para ello, es necesario conocer, para cada material, la conductividad térmica λ , el calor específico c_p y la densidad ρ en función de la temperatura, así como el contenido de humedad, el coeficiente de transferencia de calor por convección α_c en las caras expuesta y no expuesta, y el coeficiente de emisividad ϵ_m .

Los últimos coeficientes son idénticos para los tres materiales. Los coeficientes de transferencia de calor por convección vienen dados por la UNE-EN 1995-1-2 :

- En la cara expuesta al fuego: $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la curva normalizada tiempo-temperatura (apartado 3.2.1. de la norma); $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ para los modelos de fuego natural simplificados (apartado 3.3.1.1 de la norma), $\epsilon_m = 0,8$ en ambos casos (apartado 3.1 de la norma);
- En la cara no expuesta al fuego: $\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$ en ambos casos. Este valor toma en cuenta los efectos combinados de la radiación y de la convección (apartado 3.1. de la norma).

Para la madera de las viguetas, se han introducido las propiedades térmicas de las tablas 4 a 6 del presente documento. Es importante señalar que el contenido de humedad se ha igualado a 0 en el programa ya que los valores de la densidad y del calor específico ya lo tienen en consideración. Las propiedades de los ladrillos se han implementado de manera análoga.

En cuanto al relleno de mortero de cal, se ha utilizado el material de tipo *Insulation*, cuyas propiedades no dependen de la temperatura y son constantes durante todo el cálculo.

Una vez definidos y asignados los materiales, se definen las condiciones de contorno, asociando una curva tiempo-temperatura a los bordes de la sección. La figura 28 representa las condiciones de contorno impuestas para los problemas sometidos al fuego normalizado FISO, ya integrado en el programa.

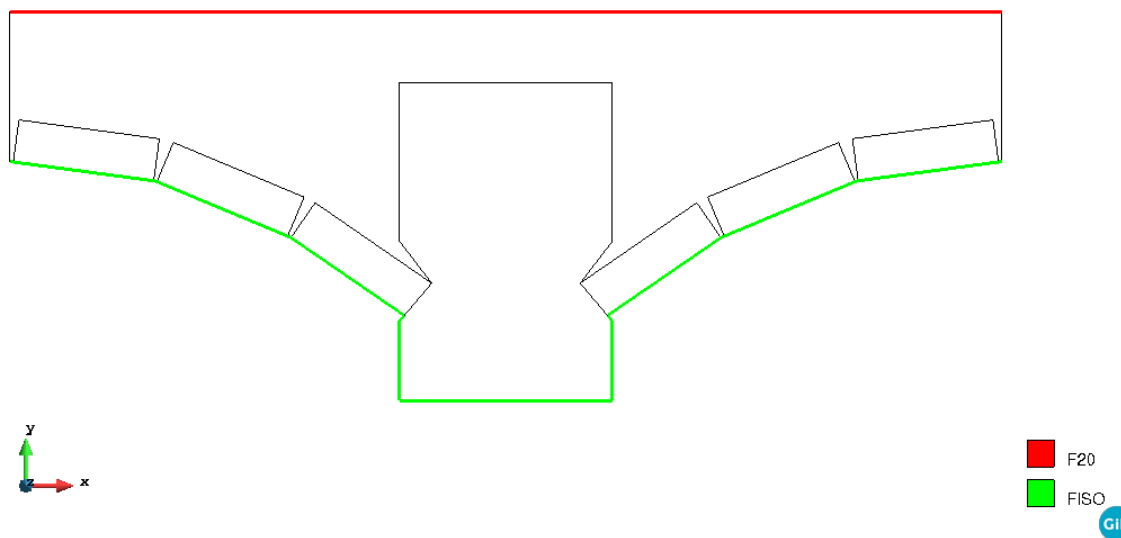


Figura 28. Condiciones de contorno del problema térmico.

La condición F20 corresponde a una temperatura constante e igual a 20°C, temperatura ambiente, durante todo el intervalo de tiempo estudiado. En cuanto a los bordes sin condición inicial, se considera un comportamiento adiabático, es decir que no intercambia calor con su entorno.

Finalmente, se genera el mallado de elementos finitos (fig. 29).

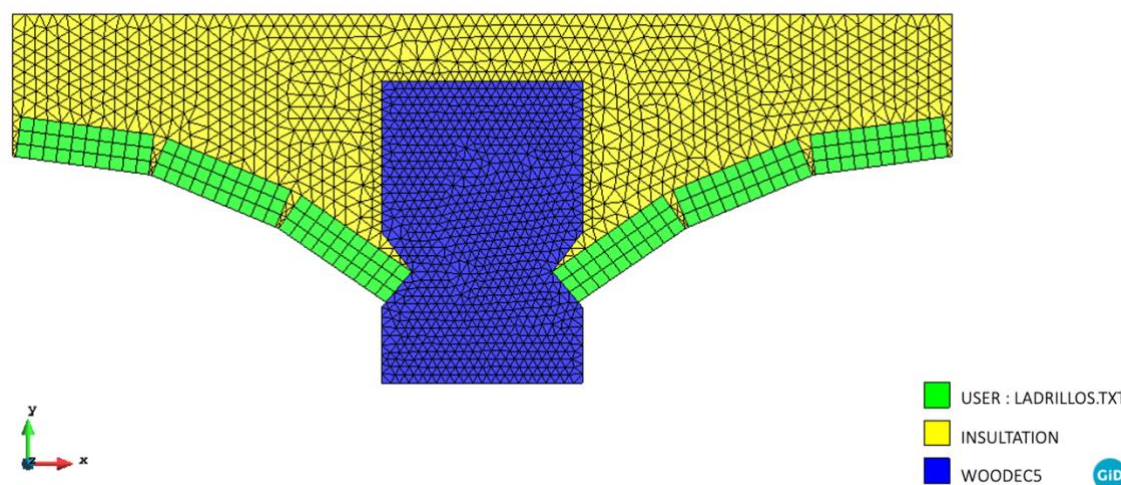


Figura 29. Malla generada y materiales asignados.

Para los ladrillos, se ha utilizado elementos finitos cuadrados de 1 cm (en verde en la figura 30). La vigueta de madera se ha modelizado mediante elementos triangulares para adaptarse a la forma peculiar que tiene, generada

por la presencia de las muescas (en azul). Estos elementos son más pequeños que los de los ladrillos ya que interesa obtener resultados precisos en la madera, debido a su carácter desfavorable en la resistencia al fuego del forjado. Finalmente, los elementos finitos del relleno son triangulares y más gruesos que los creados para la madera, ya que no es pertinente conocer con precisión el campo de temperatura en el mortero (en amarillo).

Una vez procesado el cálculo en SAFIR, se visualizan los campos de temperatura en el postprocesador Diamond. Los resultados obtenidos para los análisis realizados pueden consultarse en el Anejo nº2. Se presentan los campos de temperatura cada 15 minutos, así como en los instantes de máxima temperatura de la curva de fuego y máxima temperatura en el interior de la sección para las curvas paramétricas.

A continuación, en las figuras 30 y 31, se muestran los campos de temperaturas para la exposición al fuego ISO-834 en los instantes $t = 30$ min y $t = 60$ min.

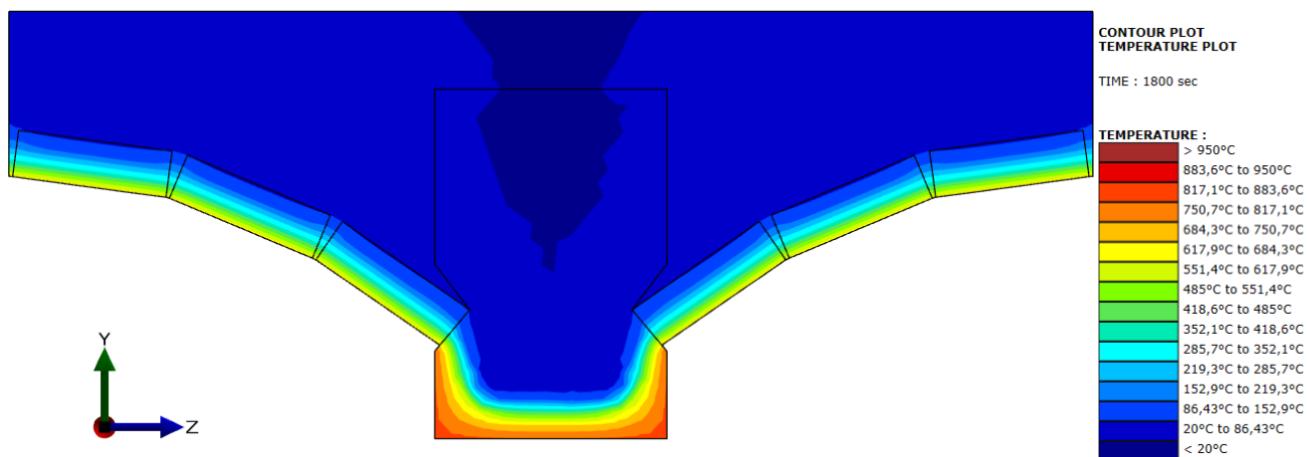


Figura 30. Campo de temperaturas obtenido en SAFIR para el forjado expuesto al fuego normalizado, en el instante $t = 30$ min.

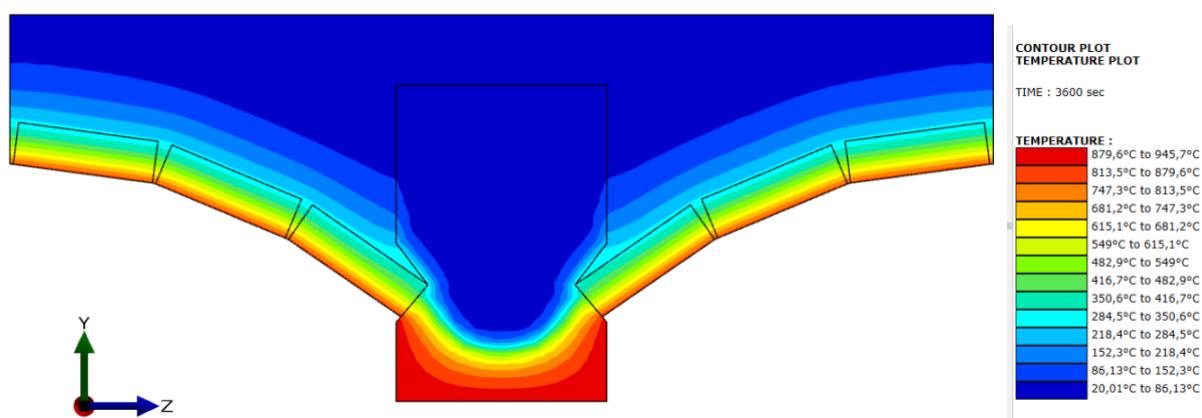


Figura 31. Campo de temperaturas obtenido en SAFIR para el forjado expuesto al fuego normalizado, en el instante $t = 60$ min.

4.3 MODELOS MECÁNICOS

4.3.1 MÉTODOS DE CÁLCULO MECÁNICO SIMPLIFICADOS DEL EUROCÓDIGO 5

4.3.1.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

Par calcular la resistencia mecánica de la madera sometida a un incendio, el Eurocódigo 5 Parte 1-2 define dos métodos simplificados llamados (1) Método de la Sección Reducida (MSR) y (2) Método de las Propiedades Reducidas (MPR). Los dos métodos se basan en los resultados del análisis térmico realizado anteriormente y en el concepto de profundidad carbonizada.

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.1, la carbonización de la madera disminuye considerablemente sus características mecánicas mientras que la madera por dentro de la capa carbonizada, denominada “sección residual”, conserva sus propiedades iniciales. De acuerdo con la UNE-EN 1995-1-2 y la figura 13, la madera carbonizada es aquella cuya temperatura se sitúa por encima de los 300°C. La norma propone métodos simplificados para determinar la profundidad de carbonización de la madera en función del número de caras expuestas al fuego.

Para una pieza sometida a la acción del fuego en una cara, la profundidad carbonizada $d_{char,0}$ se calcula multiplicando el tiempo de exposición al fuego por una velocidad de carbonización unidimensional β_0 . En cambio, cuando más de una cara está expuesta al fuego, las aristas se redondean y conviene considerar una velocidad de carbonización ficticia β_n de manera que las secciones residuales real y de cálculo tengan propiedades geométricas similares (figura 32).

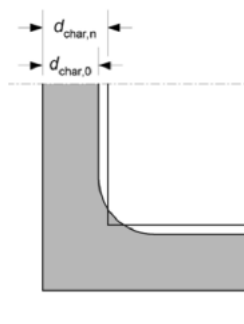


Figura 32. Profundidad carbonizada $d_{char,0}$ para la carbonización unidimensional y profundidad de carbonización ficticia

$d_{char,n}$

Fuente: Figura 3.2 de la UNE-EN 1995-1-2:2019

No obstante, la sección tipo del forjado estudiado tiene una geometría particular que no permite aplicar directamente el método de cálculo de la profundidad carbonizada de la norma. En efecto, al principio del incendio, se puede asumir que la vigueta de madera sufre la acción del fuego en 3 de sus caras, pero una vez carbonizados los 5,6 cm de la parte inferior de la pieza, la agresión por fuego pasa a ser unidimensional – en el borde inferior

únicamente. Por lo tanto, se utilizará la profundidad de la isoterma de 300°C como profundidad carbonizada en la aplicación de los métodos simplificados. Para ilustrar la diferencia comentada, se pueden ver las profundidades de carbonización según el método que se emplee en la tabla 23.

Tabla 23. Profundidades de carbonización en función del método de cálculo (mm).

Instante de cálculo	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min
UNE-EN 1995-1-2:2019	12,0	16,0	24,0	33,8	43,5
Isoterma 300 (SAFIR)	10,9	14,2	20,5	29,3	39,0

Además, la norma estipula que las velocidades de carbonización se basan en la curva tiempo-temperatura ISO-834, por tanto conviene particularmente emplear los resultados obtenidos en SAFIR para las curvas paramétricas.

4.3.1.2 VALORES DE CÁLCULO DE LAS ACCIONES ESTÁTICAS

Antes de proceder al cálculo de las tensiones en las secciones de madera, es necesario calcular las acciones exteriores a considerar en la situación de proyecto accidental. Según el CTE (*Apartado 4.2.2. Combinación de acciones*), la combinación de acciones en situación extraordinaria es:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Los coeficientes de seguridad γ se igualan a 1 para las acciones desfavorables. Los coeficientes de simultaneidad ψ se toman de la tabla 4.2 del CTE (tabla 24 del documento), en la primera línea: “Zonas residenciales (Categoría A)”.

Tabla 24. Coeficientes de simultaneidad.

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)			
	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría F)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría G)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría H)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento			
	0,6	0,5	0
Temperatura			
	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno			
	0,7	0,7	0,7

(1) En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Fuente: Tabla 4.2 del CTE

Por lo tanto, se deduce la expresión siguiente:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 0,3 \cdot \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}$$

Cargas permanentes a considerar

La primera de las cargas permanentes a considerar es el peso propio del forjado. Para su cálculo, se extraen las áreas de cada uno de los materiales (madera, ladrillo, relleno) en la sección transversal mediante AutoCAD. Se multiplica luego este área por la densidad del material. Así, se obtiene el valor del peso propio distribuido a lo largo de la vigueta. El resultado del cálculo se encuentra en la tabla 25.

Tabla 25. Cálculo del peso propio del forjado.

	Densidad (kg/m ³)	Densidad (kN/m ³)	Sección transversal (m ²)	Carga lineal (kN/ml)
Vigueta	575	5,64075	0,0325	0,18
Ladrillos	1800	17,658	0,018	0,32
Relleno	1900	18,639	0,0694	1,29
Total				1,79

Además, se debe tomar en consideración el peso propio de la tabiquería y del pavimento del suelo. Según el DB-SE-AE del CTE, el valor a considerar para la tabiquería en las viviendas es de 1,0 kN/m² (apartado 2.1) y el valor asociado a los pavimentos cerámicos con un espesor menor de 8 cm es de 1,0 kN/m² (Tabla C.5). Puesto que el forjado tiene un intereje de 70cm, cada carga muerta adicional es de 0,70 kN/m. Entonces:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} = 1,79 + 2 \cdot 0,7 = 3,19 \text{ kN/m}$$

Cargas variables a considerar

La única carga variable a considerar en el cálculo de las acciones es la sobrecarga de uso. Para las viviendas y zonas de habitaciones en hospitales y hoteles, se utiliza un carga uniforme de 2 kN/m² según la Tabla 3.1 del CTE DB-SE-AE. Así, se obtiene una carga lineal de 1,4 kN/m.

Efectuando la combinación de acciones aplicable a la situación accidental, el valor de cálculo de la carga a aplicar a la viga estudiada es :

$$q_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 0,3 \cdot \sum_{i \geq 1} Q_{k,i} = 3,19 + 0,3 \cdot 1,4 = 3,61 \text{ kN/m}$$

4.3.1.3 VALORES DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

En situación de incendio, la resistencia de cálculo de la madera es más elevada que en la situación normal. Su cálculo es el siguiente:

$$X_d = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{X_{20}}{\gamma_M}$$

Donde:

- X_d : valor de cálculo del material;
- $k_{mod,fi}$: factor de modificación;
- $k_{fi} = 1,25$ para la madera maciza según la tabla 2.1 de la UNE-EN 1995-1-2:2019;
- $\gamma_M = 1$ en situación de proyecto accidental;
- X_k : percentil del 20% de la propiedad, obtenido en 3.3.3.

De esta manera, se obtiene:

- $f_{m,d} = k_{mod,fi} \cdot 1,25 \cdot 12 = k_{mod,fi} \cdot 15 \text{ MPa}$
- $E_{m,d} = k_{mod,fi} \cdot 1,25 \cdot 13000 = k_{mod,fi} \cdot 16250 \text{ MPa}$

4.3.1.4 MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

El primer método simplificado propuesto por el Eurocódigo 5 es el Método de la Sección Reducida (apartado 4.2.2 de la UNE-EN 1995-1-2:2019). Este método se basa en el cálculo de una sección eficaz y considera que esta sección resiste la totalidad de la sollicitación.

La posición de la sección eficaz dentro de la pieza de madera debe calcularse considerando una capa de resistencia nula detrás de la capa carbonizada. La profundidad a la que se encuentra el límite entre la sección eficaz y la capa de resistencia es la profundidad eficaz carbonizada d_{ef} :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

Donde:

- $d_0 = 7 \text{ mm}$
- $k_0 = t/20$ para $t < 20 \text{ min}$ y $k_0 = 1$ para $t \geq 20 \text{ min}$, para las superficies no protegidas.

No obstante, por las mismas razones que se han expuesto anteriormente, la particularidad de la geometría de la sección transversal no permite aplicar directamente la profundidad eficaz carbonizada. Para eludir esta limitación, varias referencias bibliográficas proponen estrategias alternativas. Richter et al. [17] han adoptado la línea isoterma de 200°C como límite, ya que esta temperatura coincide con el principio del fenómeno de pirolisis, pero los resultados de laboratorio y numéricos no correspondían. En [15], Garcia-Castillo et al. proponen el uso de la línea isoterma de 135°C como límite de la capa de resistencia nula. Los ensayos numéricos realizados a partir de

este criterio han demostrado resistencias al fuego similares entre el modelo de cálculo avanzado en SAFIR y el MSR con la isoterma de 135°C. Se decide, pues, adoptar este criterio en este trabajo.

Por otra parte, en el método de la sección reducida, los valores de cálculo de las propiedades de resistencia y de rigidez de la sección eficaz se calculan con $k_{mod,fi} = 1$ en todo instante. Las propiedades mecánicas de cálculo resultantes son las siguientes:

- $f_{m,d,fi} = 15 \text{ MPa}$
- $E_{m,d,fi} = 16250 \text{ MPa}$

A continuación, se realiza un ejemplo de cálculo de la tensión máxima según el MSR, para el caso de una viga del local A expuesta al fuego normalizado.

Para ello, se calcula primero el momento solicitante en la sección más desfavorable de la viga, es decir en la sección de centro luz:

$$M_{max} = \frac{q_d \cdot L^2}{8} = \frac{3,61 \cdot 2,47^2}{8} = 2,76 \text{ kN.m}$$

Luego se obtienen la inercia y la máxima distancia entre la fibra neutra y un borde de la sección eficaz, mediante AutoCAD, se calcula el momento plástico de la sección eficaz y se deduce finalmente la máxima tensión de flexión, a partir de las expresiones siguientes:

$$W_{min} = \frac{I_y}{z_{max}}$$
$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{min}}$$

Se recopilan en la tabla 26 los resultados del caso anterior.

Tabla 26. Resultados del método de la sección reducida para la exposición al fuego normalizado en el local A.

Tiempo (min)	0	15	20	30	45	60
Propiedades geométricas (AutoCAD)						
I (cm ⁴)	14113	10055	9232	7986	6286	4908
Z _{max} (cm)	11,36	11,08	11,02	10,89	10,64	10,21
W (cm ³)	1242,12	907,61	837,84	733,17	590,53	480,56
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2019 Apartado 2.3)						
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión en la sección de centro-luz						
σ _{max} (MPa)	2,22	3,04	3,29	3,76	4,67	5,74
FS	6,76	4,94	4,56	3,99	3,21	2,61

Se define como factor de seguridad (FS) la división de la resistencia de cálculo $f_{m,d,fi}$ por la máxima tensión calculada en la sección σ_{max} . Un factor de seguridad inferior a la unidad significa el fallo de la sección bajo la acción del fuego.

Los resultados del MSR para todos los casos se pueden ver en el Anejo nº3.

4.3.1.5 MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

El segundo método simplificado contemplado por el Eurocódigo 5 es el Método de las Propiedades Reducidas (apartado 4.2.3. de la norma). En este método, la sección de la pieza a considerar es su parte no carbonizada, es decir sustituyéndole la profundidad de carbonización. Como se ha comentado anteriormente, se va a utilizar la isoterma 300 como referencia de la profundidad carbonizada.

Tal y como lo indica su nombre, el MPR se basa en reducir las propiedades de la madera en función de las características geométricas de la sección (perímetro p y área A_r de la sección residual). Para ello, se modifica el factor $k_{mod,fi}$ de la siguiente manera para instante de cálculo superiores a 20 minutos.:

- $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_r}$ para la resistencia a flexión;
- $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}$ para la resistencia a tracción.

Para los instantes entre 0 y 20 minutos, se realiza una interpolación lineal entre 1 y el factor $k_{mod,fi}$ obtenido para t=20 min.

De manera análoga a los cálculos realizados con el MSR, se obtiene la tensión máxima en la sección de centro-luz (tabla 27).

Tabla 27. Resultados del método de las propiedades reducidas para la exposición al fuego normalizado en el local A.

Tiempo (min)	0	15	20	30	45	60
Propiedades geométricas (AutoCAD)						
I (cm ⁴)	14113	11108	10311	8885	7143	5786
z _{max} (cm)	11,36	11,21	11,14	11,01	10,80	10,38
W (cm ³)	1242,12	991,32	925,95	807,31	661,33	557,33
p (cm)	78,19	71,89	70,23	67,37	63,69	60,11
A _T (cm ²)	324,780	296,342	288,628	274,336	255,882	239,703
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2019 Apartado 2.3)						
k _{mod,fi}	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987
f _{d,fi} (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98
k _{mod,fi}	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16241,01	16238,02	16237,91	16237,74	16237,65
Tensión en centro-luz						
s _{max} (MPa)	0,8	1,0	1,0	1,2	1,5	1,9
FS	2,22	2,78	2,98	3,41	4,17	4,95

Los resultados del MPR para todos los casos también se pueden ver en el Anejo n°3. Además, las curvas isoterma se pueden visualizar en los planos n°5.1 a 5.7.

4.3.2 MODELO MECÁNICO AVANZADO NUMÉRICO

Finalmente, para poder realizar una comparación la más completa posible, se propone analizar el comportamiento estructural del forjado de revoltones mediante un modelo numérico avanzado en SAFIR.

Según la UNE-EN 1995-1-2:2019, los modelos avanzados deben considerar el comportamiento evolutivo de la madera en función de la temperatura. En su *Anexo B. Métodos de cálculo avanzados*, la norma facilita los coeficientes de reducción de la resistencia y del módulo de elasticidad paralelos a la fibras para las maderas de coníferas. (fig. 33 y 34), dependiendo del tipo de sollicitación: compresión, cortante o tracción.

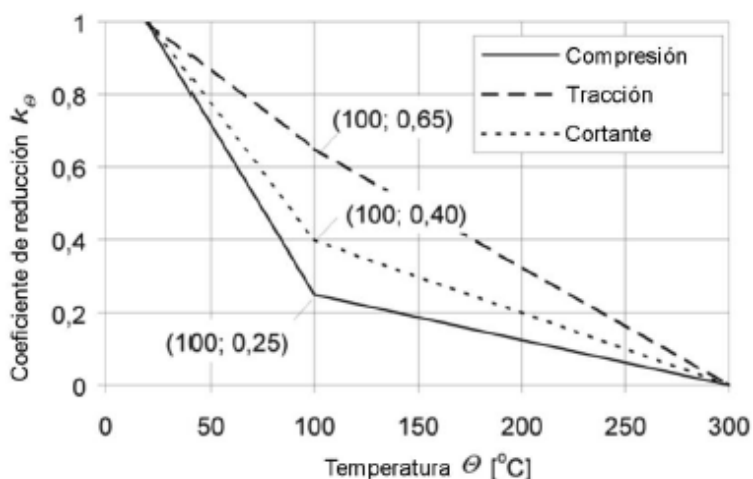


Figura 33. Coeficiente de reducción para las resistencias paralelas a las fibras de la madera de conífera

Fuente: Figura B.4 de la UNE-EN 1995-1-2:2019

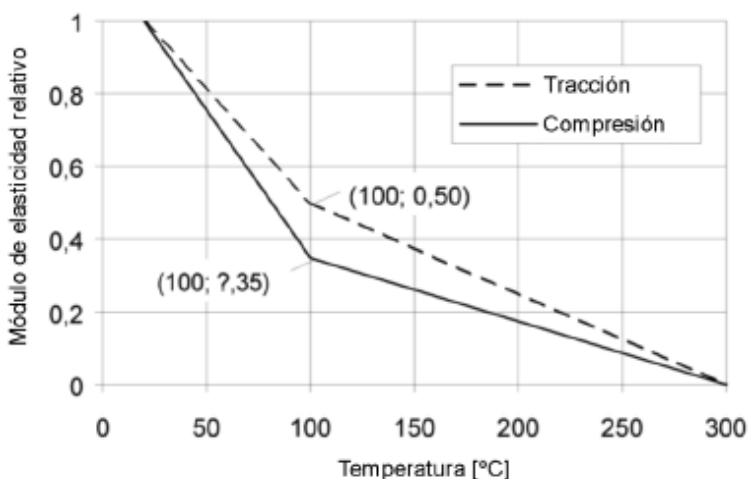


Figura 34. Coeficiente de reducción para el módulo de elasticidad paralelo a las fibras de la madera de conífera

Fuente: Figura B.5 de la UNE-EN 1995-1-2:2019

El programa SAFIR tiene este comportamiento implementado en las propiedades de su material WOODEC5. Se han de introducir únicamente la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

La primera etapa del cálculo mecánico es la definición de los elementos. En el presente caso, las viguetas de madera del forjado se han modelizado mediante vigas biapoyadas, isostáticas, y se han discretizado en elementos finitos 1D. Luego, se aplica la carga calculada anteriormente y se asigna una sección transversal a la viga. Para ello, se designa el archivo en el cual están guardados los resultados del análisis térmico. De esta manera, el programa calcula la distribución de las tensiones en la sección, prescindiendo de las partes carbonizadas y afectando el coeficiente de reducción a las fibras con una temperatura superior a 20°C.

Visualizando los campos de tensiones en la sección de centro-luz a lo largo del tiempo (fig. 35), se obtienen las máximas tensiones, comparables con las de los métodos simplificados.

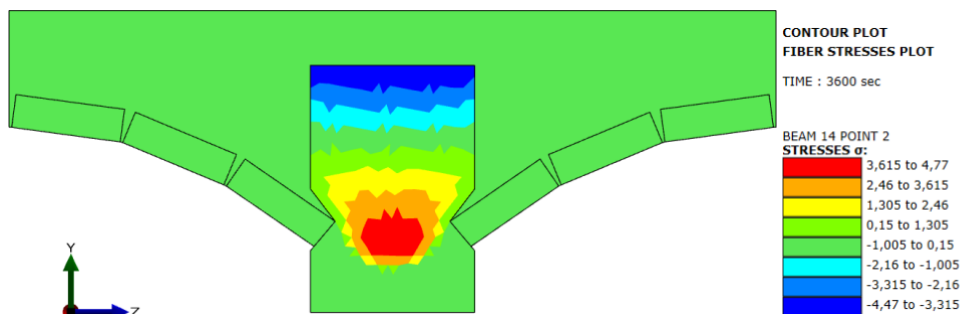


Figura 35. Campo de tensiones obtenido en SAFIR para las viguetas del local A, sometidas al fuego normalizado, en el instante t=60 min.

Además, al parar el cálculo en el momento de fallo estructural del elemento estudiado, el software proporciona el tiempo de resistencia a fuego del forjado.

4.3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Primero, se propone comparar el factor de seguridad obtenido en la sección en función del método de cálculo simplificado empleado, para un mismo recinto. Las gráficas de las figuras 36 a 38 representan la evolución del factor de seguridad en la sección central de las viguetas del local A sometidas a los 3 escenarios de fuego..

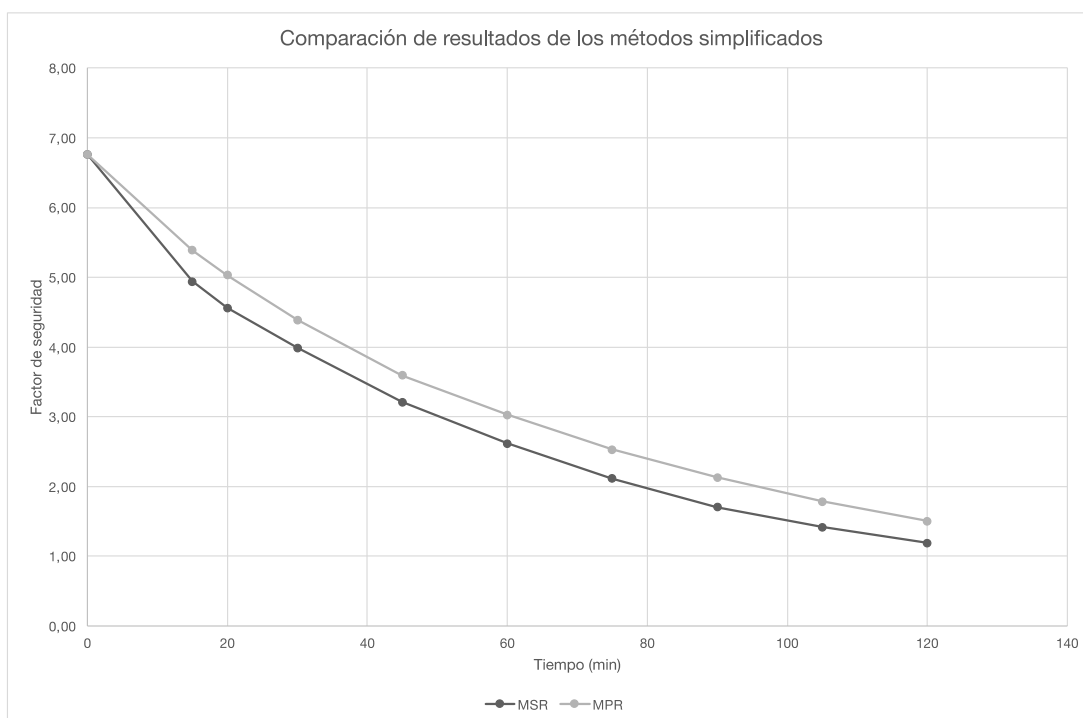


Figura 36. Factor de seguridad, Local A, Fuego ISO 834.

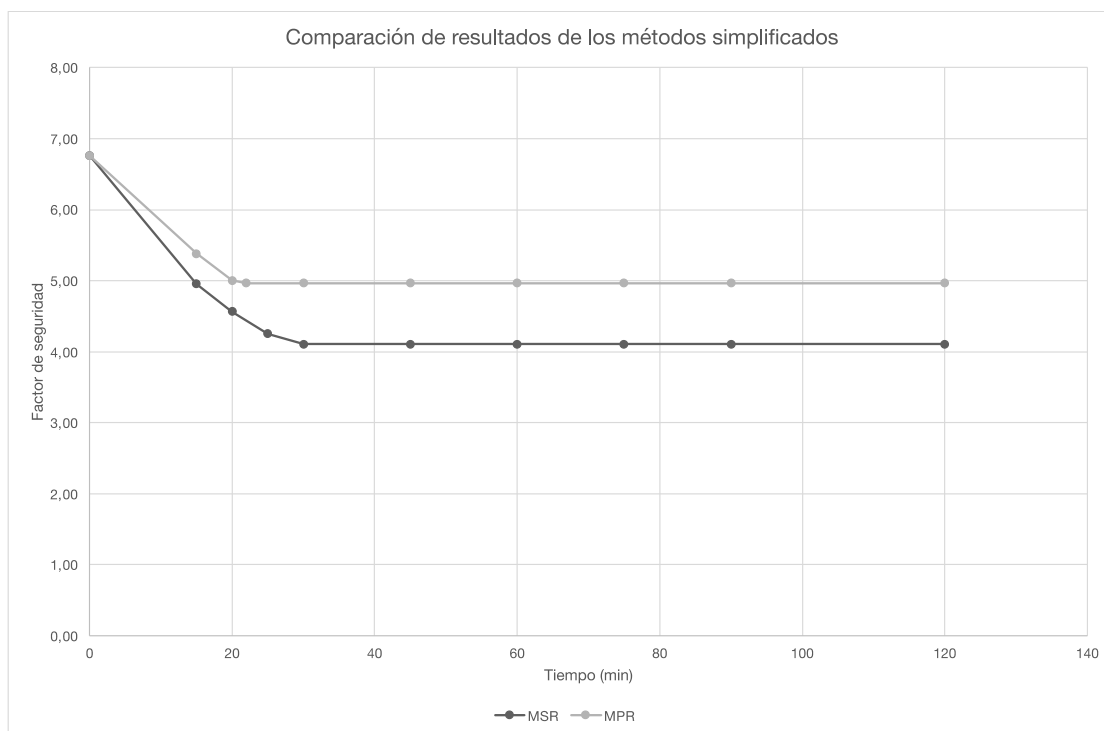


Figura 37. Factor de seguridad, Local A, Fuego paramétrico A1.

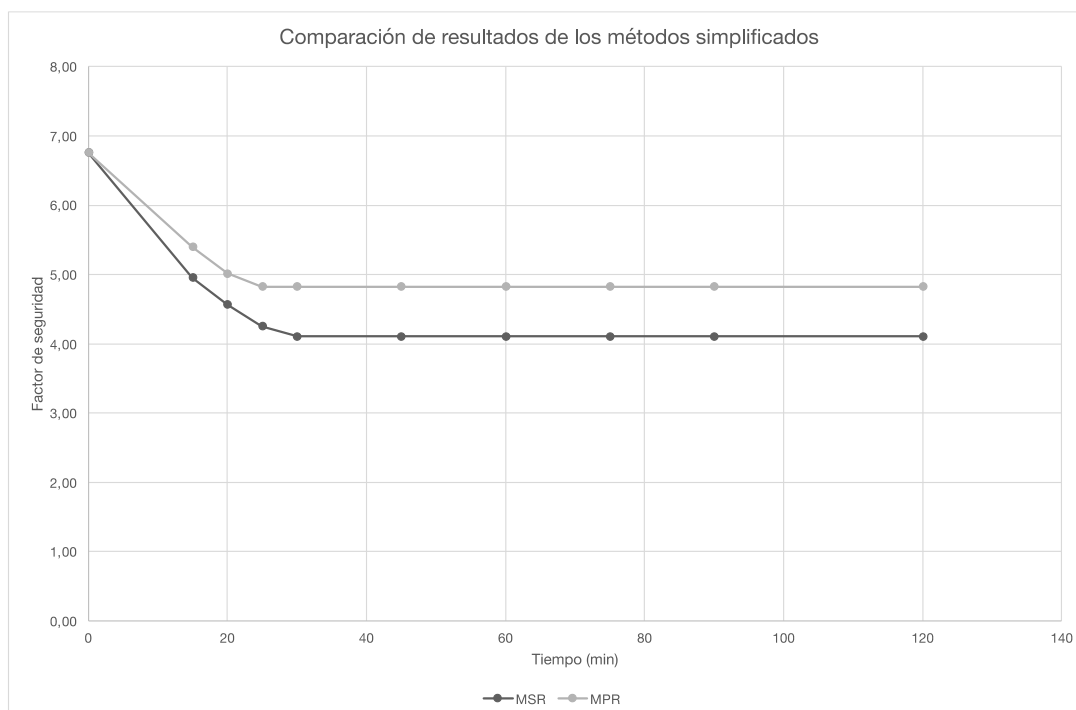


Figura 38. Factor de seguridad, Local A, Fuego paramétrico A2.

Se puede observar una tendencia distinta en función del modelo de fuego considerado. En primer lugar, para la exposición al fuego ISO 834, los dos métodos de cálculo proporcionan resultados similares : el factor de seguridad

disminuye continuamente ya que la temperatura de los gases, y consecuentemente la temperatura de la madera, aumenta durante todo el incendio. Además, el método de la sección reducida es el más desfavorable de los dos.

En cambio, las curvas de fuego paramétrico presentan una fase de calentamiento y una fase de enfriamiento y, por tanto, existe un momento en el que la profundidad carbonizada ya no sigue aumentando. En las figuras 38 y 39 puede observarse que el factor de seguridad pasa a ser constante, lo que corresponde a esta situación.

Por otra parte, se puede ver que el método de la sección reducida sigue proporcionando los resultados más desfavorables de los métodos simplificados.

En segundo lugar, se pueden comparar los resultados obtenidos para una misma exposición térmica en función de la luz de los elementos. Esto es posible analizando los factores de seguridad para la exposición al fuego normalizado para los locales A, B y C que presentan respectivamente una luz de 2,47 m; 4,08 m y 4,87 m (fig. 39).

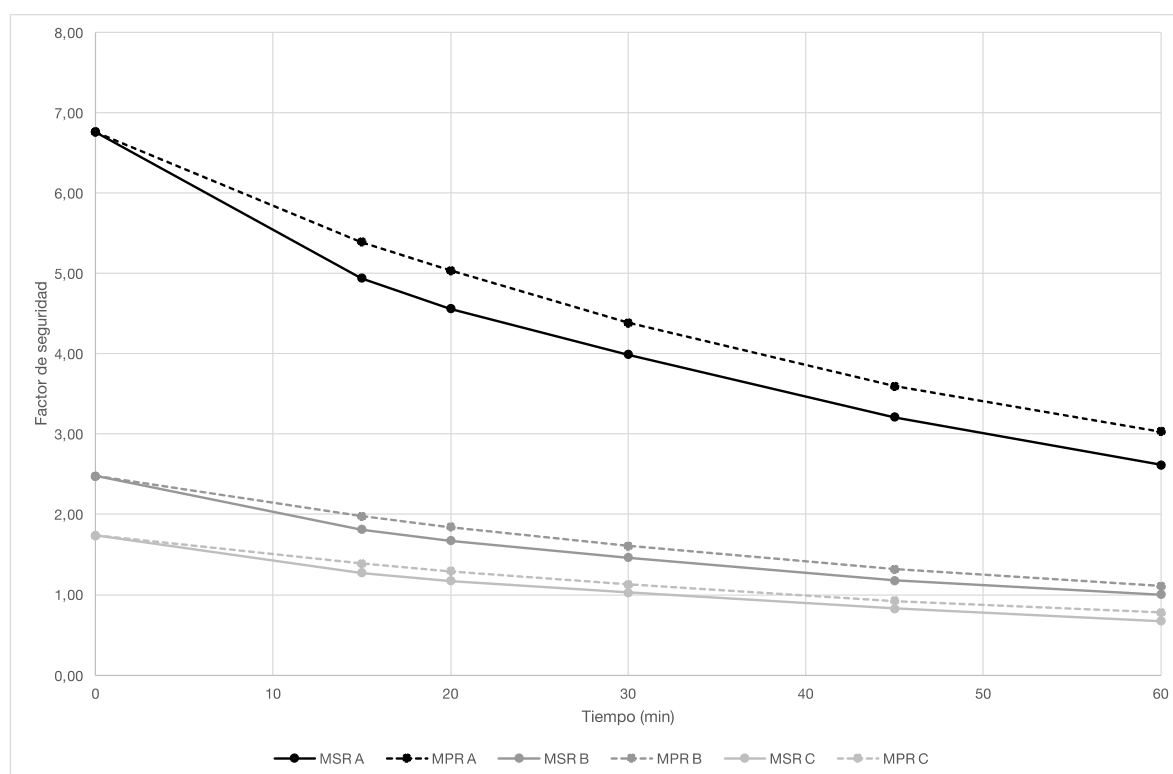


Figura 39. Comparación de resultados según la luz de la vigueta.

Tal y como se podía esperar, el factor de seguridad disminuye considerablemente con el aumento de la luz. En efecto, aunque en el local A el forjado cumple las exigencias de resistencia al fuego establecidas por el CTE, en el local B el factor se acerca a la unidad y en el local C se alcanza la unidad a los 50 minutos, significando que se produce el fallo estructural y que el forjado necesita refuerzo.

Como consecuencia, el último criterio a comparar entre los métodos de cálculo es el tiempo de resistencia a fuego para cada uno de los tres locales (tablas 28 a 30). En esta comparación, se incluyen también los resultados del modelo numérico en SAFIR ya que se trata de un criterio universal para métodos simplificados y avanzados.

Tabla 28. Tiempos de resistencia a fuego del forjado para el local A (7 m²)

Modelo de fuego	Método de la sección reducida	Método de las propiedades reducidas	SAFIR
ISO 834	120 min	120 min	120 min
Paramétrico A1	120 min	120 min	120 min
Paramétrico A2	120 min	120 min	120 min

Tabla 29. Tiempos de resistencia a fuego del forjado para el local B (16 m²)

Modelo de fuego	Método de la sección reducida	Método de las propiedades reducidas	SAFIR
ISO 834	60 min	90 min	60 min
Paramétrico B1	120 min	120 min	120 min
Paramétrico B4	46 min	120 min	50 min

Tabla 30. Tiempos de resistencia a fuego del forjado para el local C (25m²)

Modelo de fuego	Método de la sección reducida	Método de las propiedades reducidas	SAFIR
ISO 834	33 min	40 min	35 min
Paramétrico C1	120 min	120 min	62 min
Paramétrico C2	25 min	120 min	39 min

Los resultados marcados en rojo indican que no se cumple la exigencia de resistencia al fuego de 60 minutos y los tiempos de resistencia iguales a 120 minutos significan que no se produce el fallo durante todo el intervalo de tiempo de cálculo.

Se puede ver que para los 3 modelos de fuego, las viguetas de madera del local A resisten durante toda la duración del incendio. En cuanto al local B, la exposición al fuego normalizado causa el fallo de la sección según los cálculos de los tres métodos, pero este fallo se produce después de 60 minutos. Cabe destacar que bajo la exposición al fuego paramétrico B4, los resultados del MSR y del modelo numérico indican que el forjado no resiste las acciones en situación accidental después de 50 minutos. Esto es debido a que la fase de calentamiento es más súbita y alcanza una temperatura máxima más elevada que en las otras hipótesis. Finalmente, como se ha comentado antes, el fallo de las viguetas del local C ocurre antes de los 60 minutos bajo la acción del fuego normalizado, pero también bajo la acción del fuego paramétrico C2.

De forma general, los resultados muestran que considerar únicamente la acción del fuego normativo no es siempre conservador. En efecto, aunque no considere la fase de enfriamiento del incendio, puede minorar las

temperaturas de la fase de calentamiento y por tanto, despreciar los efectos de las condiciones físicas reales del recinto.

Por otra parte, puede observarse en las tablas anteriores que el modelo numérico en SAFIR y el Método de la Sección Reducida proporcionan tiempos de resistencia al fallo similares y más desfavorables que el Método de las Propiedades Reducidas. De hecho, se ha escogido la curva isoterma de 135°C como referencia para delimitar la sección aplicable al MSR, la cual se ha calibrado mediante ensayos numéricos. Por tanto, se da por válida la hipótesis propuesta en [15] para su aplicación a los forjados de revoltones de ladrillos. Se puede intuir que esta propuesta sería particularmente adaptada al cálculo de piezas de geometría más sencilla, como son los elementos de madera laminada encolada empleados hoy en día.

Puesto que no se cumplen las exigencias básicas de tiempo de resistencia al fuego del CTE, se procede a continuación al diseño de un sistema de refuerzo para las viguetas del dormitorio doble (local B) y del salón (local C). Para anticipar los resultados que se obtendrían analizando las viguetas de las otras habitaciones de la vivienda, se propone aplicar el sistema de refuerzo diseñado a todos los elementos cuya luz sea mayor de 4 metros.

Cabe destacar que los resultados de los análisis térmicos muestran que la madera en la zona de apoyo de los ladrillos supera los 300°C en todos los escenarios de fuego y, por tanto, se podría pensar que es posible el fallo del forjado por pérdida de soporte. No obstante, no se puede predecir exactamente el comportamiento en caso de pérdida de vigueta : al tener un carácter ignífugo, el relleno de mortero de cal juega un papel estructural que puede seguir sosteniendo los ladrillos durante el incendio y asegurar la integridad del forjado, tal y como se puede ver en la figura siguiente.



Figura 40. Forjado de revoltones sin vigueta.

Fuente: [6]

5 DISEÑO DE UN SISTEMA DE REFUERZO

5.1 VIGAS PARTELUCES

Puesto que se ha concluido en el apartado anterior que la luz de la viga tiene una influencia importante en su tiempo de resistencia al fuego, la primera solución propuesta consiste en reducir dicha luz. Para ello, se coloca una viga intermedia, generalmente metálica, en dirección perpendicular a las viguetas de madera existentes.



Figura 41. Ejemplo de refuerzo mediante la colocación de una viga parteluz.

Fuente: www.reotec.es

Este sistema modifica las condiciones de apoyo de las viguetas de madera : pasan a ser vigas continuas de dos vanos o más y, por tanto, se reduce considerablemente el momento flector.

Dada la luz existente, bastaría con colocar una única viga parteluz. Suponiendo una situación idónea en la que la luz se divide en dos partes iguales la ley de flectores cambiaría de la siguiente forma :

Tabla 31. Modificación del máximo momento flector.

	Situación inicial	Situación post-refuerzo
Ley de flectores	<p>1. Sollicitations dans le plan d'inertie maximale</p> <p>Réactions d'appuis: $0,5 p\ell$, $0,5 p\ell$, $0,5 p\ell$, $0,5 p\ell$</p> <p>Moment de flexion maximum: $M_{max} = \frac{p \ell^2}{8}$</p> <p>Flèches maximum: $f_0 = \frac{5}{384} \frac{p \ell^4}{EI} < \frac{\ell}{200}$</p>	<p>1. Sollicitations dans le plan d'inertie maximale</p> <p>Réactions d'appuis: $0,375 p\ell$, $1,25 p\ell$, $0,375 p\ell$</p> <p>Moment de flexion maximum: $M_{max} = -\frac{p \ell^2}{8}$</p> <p>Flèches maximum: $f_0 = \frac{5}{384} \frac{p \ell^4}{EI} < \frac{\ell}{200}$</p>
Máximo momento flector	$M_{max, inicial} = \frac{q_d \cdot L^2}{8}$	<p>En apoyo :</p> $M_{max, final} = \frac{q_d \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2}{8}$ $M_{max, final} = \frac{q_d \cdot L^2}{32}$ $M_{max, final} = M_{max, inicial} / 4$ <p>En vano :</p> $M_{max, final} = \frac{9 \cdot q_d \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2}{128}$ $M_{max, final} = \frac{9 \cdot q_d \cdot L^2}{512}$ $M_{max, final} = \frac{9}{64} \cdot M_{max, inicial}$

Además, como la ley de Navier para el cálculo de la tensión de flexión es directamente proporcional al momento flector de sollicitación, la máxima tensión en centro de vano en la situación inicial se vería dividida por 4, lo que resulta muy interesante desde el punto de vista de la resistencia al fuego.

En cuanto al diseño de la viga parteluz, este se hace modelizando una viga biapoyada con una carga puntual por vigueta que se apoye sobre el perfil metálico.

No obstante, esta solución supone varios problemas respecto al edificio a reforzar. En primer lugar, debe verificarse la resistencia del muro de carga frente a las reacciones de apoyo de la viga principal. En efecto, no realizar esta comprobación podría simplemente “desplazar” el problema y hacer que aparezcan grietas de compresión en los muros de carga, incluso en la situación persistente de proyecto. Además, la ejecución de elementos metálicos para el refuerzo de estructuras sometidas a fuego necesita la aplicación de una protección

frente al ataque térmico ya que son muy vulnerables a esta sollicitación. Concretamente, se aplica una pintura intumescente, que se convierte en espuma cuando está sometida a temperaturas elevadas, la cual protege el elemento metálico; o se realiza el flocado del elemento, que actúa como una capa aislante. Entonces, el inconveniente de la colocación de viga parteluz es su aspecto estético : añadir una viga metálica a la estructura de madera afectaría su aspecto visual. Por lo tanto, se descarta esta primera proposición de refuerzo.

5.2 SUSTITUCIÓN FUNCIONAL MEDIANTE PERFILES METÁLICOS

Otra solución de refuerzo, es la sustitución funcional de las viguetas de madera mediante perfiles metálicos. Existen actualmente dos sistemas patentados equivalentes : MECANOVIGA y NOUBAU. Consisten en apoyar cada vigueta de madera sobre un perfil metálico, de forma que todas las cargas se transmitan al perfil. Para realizar una conexión completa entre la madera y el perfil metálico, se rellena el espacio vacío con un mortero (fig. 42).

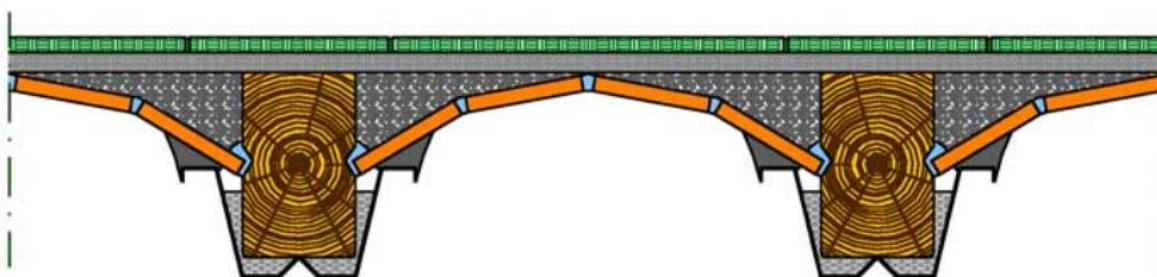


Figura 42. Sección transversal del sistema NOUBAU

Fuente: noubau.es

Además, para descargar totalmente la viga de madera, este tipo de sistema tiene un funcionamiento análogo al pretensado en las estructuras de hormigón armado : durante la ejecución del refuerzo, se “preflecha” la viga aplicándole un flector opuesto al de las cargas gravitatorias. Así, cuando se conectan la viga antigua y la nueva, se produce una transferencia total de las cargas.

Las ventajas del uso del sistema NOUBAU/MECANOVIGA son las siguientes:

- Los perfiles metálicos no tienen un peso propio importante, por tanto no aumentan mucho las reacciones en los apoyos;
- El sistema se adapta a todas las luces, ya que se descompone en varios perfiles metálicos de longitudes variables;
- No disminuye la altura útil de la planta del edificio.

No obstante, los sistemas propuestos ocultan totalmente las viguetas de madera lo que no es deseable para conservar la identidad visual de los forjados de revoltones (fig. 43).



Figura 43. Ejemplo de aplicación del sistema NOUBAU a un forjado de revoltones de ladrillos.

Fuente: noubau.es

Por otra lado, la colocación de elementos metálicos supone aplicar una protección frente al fuego, como para el caso de las vigas parteluces, afectando aún más la singularidad visual del forjado.

5.3 REFUERZO MEDIANTE SISTEMAS FRP

La tercera propuesta de sistema de refuerzo consiste en emplear los sistemas a base de materiales poliméricos fibro-reforzados (FRP, *Fiber Reinforced Polymer* en inglés). Se clasifican como compuestos estructurales, es decir que están divididos en 2 fases: (1) el refuerzo en forma de fibras, cuyas propiedades mecánicas son muy elevadas, y (2) la matriz, mecánicamente más débil. Los sistemas FRP más comunes en el ámbito de la restauración son los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), los polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) y los polímeros reforzados con fibra de aramida (AFRP). Su principal ventaja es el gran aporte de resistencia al elemento reforzado, sin aumentar notablemente el peso propio de la estructura. Para las estructuras de madera, los materiales más adecuados son los CFRP

En la práctica, se distinguen dos tipos de refuerzo de viga mediante FRP.

El primero de ellos es el aplacado con láminas de fibra de carbono (fig. 44).



Figura 44. Refuerzo a flexión mediante aplacado con lámina de fibra de carbono.

Fuente: MAPEI

Una vez limpiado el elemento de madera, se le aplica una imprimación y un adhesivo. El mismo adhesivo se aplica también en la lámina de carbono. Finalmente, la lámina de carbono se coloca en la parte traccionada de la viga de madera y se presiona la lámina para realizar un contacto perfecto entre los elementos. Se puede ver que es un sistema bastante sencillo de uso, y su bajo peso propio simplifica su ejecución. Como consecuencia, el coste de la mano de obra es muy atractivo y compensa el coste de los materiales. La principal desventaja de esta primera opción de refuerzo con sistema FRP es el impacto visual de la lámina de carbono en la cara inferior de la viga, aunque se pueda considerar discreto.

La segunda opción de refuerzo con FRP es la colocación de barras de fibra de carbono en el interior de la sección de madera (fig. 45).



Figura 45. Refuerzo a flexión mediante aplacado con barras de fibra de carbono.

Fuente: MAPEI

Las fases de su aplicación son las siguientes: se limpia el elemento de madera y se realizan cajeados en las caras accesibles, se aplica la imprimación y una resina epoxi, se corta e introduce la barra de fibra de carbono y finalmente se eliminan los residuos de resina epoxi. Como para el sistema anterior, la aplicación de las barras FRP es muy rápida y ventajosa económicamente. Además, suele ser más discreta ya que el color de la resina epoxi se aproxima al color de la madera.

Al resultar muy interesantes estos sistemas de refuerzo, conviene estudiar su comportamiento al fuego. Puesto que los materiales FRP son de aplicación muy reciente en el ámbito de la construcción, la información acerca de sus características en caso de incendio es escasa.

El funcionamiento de las matrices poliméricas se basa en el fenómeno de transición vítrea: cuando un material rígido y frágil alcanza cierta temperatura, pasa a ser blando y similar a una goma. Para las resinas y matrices epoxídicas, la temperatura de transición vítrea se sitúa entre 65 y 105°C [18]. Esto causa la pérdida de adherencia y conexión entre el elemento de madera y el refuerzo FRP, anulando su interés estructural. Además, si la temperatura sigue aumentando hasta alcanzar los 400°C, la matriz arde y se evapora, liberando humo, calor y gases tóxicos.

Por lo tanto, conviene proteger el sistema FRP del ataque del fuego. En la figura 46, se muestran los métodos de protección frente al fuego tanto de la lámina de carbono (2 primeras soluciones), como de las barras de fibra de carbono).

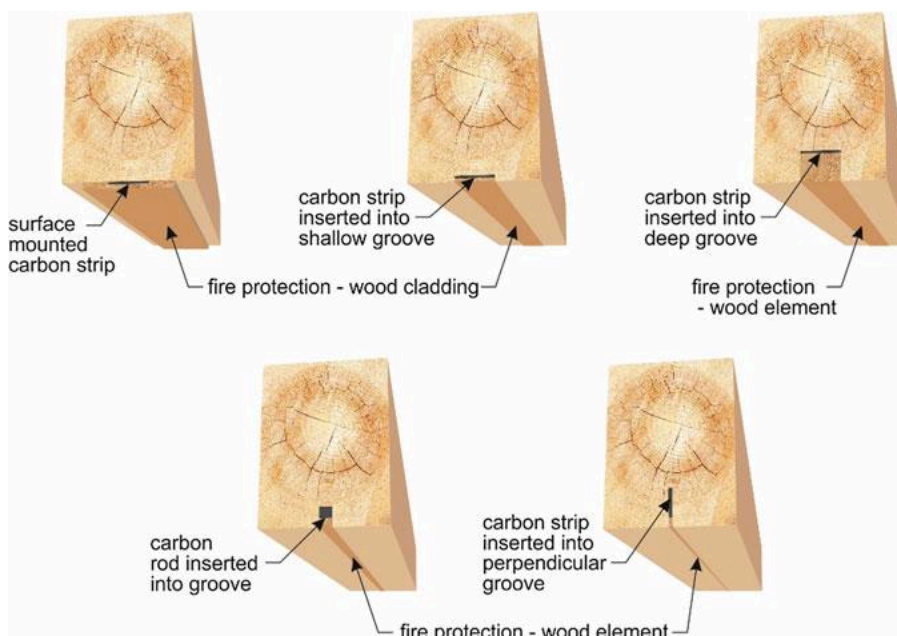


Figura 46. Protección al fuego de los sistemas FRP.

Fuente: [17]

No obstante, esta forma de proteger los sistemas del fuego no es aplicable al caso estudiado ya que el campo de temperaturas para la exposición al fuego normalizado (fig. 32) demuestra temperaturas superiores a 400°C tanto en la superficie, descartando la aplicación de láminas de FRP, como en las zonas susceptibles de alojar las barras de fibra de carbono. Emplear este tipo de sistema de refuerzo empeoraría el comportamiento al fuego ya que proporcionaría combustible al incendio..

5.4 REFUERZO MEDIANTE APORTE DE MADERA

Finalmente, se propone el refuerzo de las viguetas de madera mediante el aporte de listones de madera. Esta sencilla solución se usa frecuentemente para reforzar los elementos sometidos a esfuerzos de flexión cuando se proyecta un cambio de uso normativo. Consiste en adosar, encolar y clavar un elemento de madera en una de las caras de la vigueta que necesita la intervención. De esta forma, el momento de inercia de la sección y su módulo resistente aumentan sin impactar al resto de la estructura. La disposición exacta depende de las necesidades de refuerzo (fig. 47).

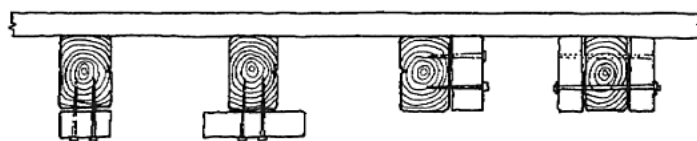


Figura 47. Refuerzo de viguetas.

Fuente: [19]

En el presente caso, interesa estudiar la primera solución de la figura anterior ya que se busca aumentar el espesor disponible para que se pueda propagar la onda de calor sin reducir demasiado la sección residual.

Para conocer el espesor del listón de madera a adosar a la pieza, se ha modificado la sección del forjado en el preprocesador GiD, empezando con un espesor de 1 cm e incrementando este espesor 1 cm cada vez. Luego se ha realizado de nuevo los análisis térmicos y mecánicos mediante SAFIR y los métodos simplificados, considerando la nueva sección.

Para las viguetas sometidas a los fuegos paramétricos, los cálculos han demostrado que un listón de madera de un espesor de 2 cm es suficiente para cumplir las exigencias de resistencia al fuego (tabla 32).

Tabla 32. Resultados de los análisis mecánicos para el refuerzo con un listón de 2cm.

Modelo de fuego	Método de la sección reducida	Método de las propiedades reducidas	SAFIR
Paramétrico B4	120 min	120 min	64 min
ISO 834 – Local C	-	-	38 min
Paramétrico C2	120 min	120 min	93 min

No obstante, este espesor no es suficiente para alcanzar los 60 minutos de resistencia al fuego para la exposición al fuego normalizado en el local C. Por lo tanto, se ha aumentado el espesor del elemento de madera adosado hasta 4 cm. Esta modificación ha permitido cumplir estrictamente el criterio según el cálculo en SAFIR.

Tabla 33. Resultados de los análisis mecánicos para el refuerzo con un listón de 4 cm.

Modelo de fuego	Método de la sección reducida	Método de las propiedades reducidas	SAFIR
ISO 834 – Local C	60 min	120 min	60 min

Finalmente, para asegurar que los dos elementos trabajen conjuntamente, se ha de prestar una atención particular a la unión entre la vigueta existente y el listón de madera aportado. En efecto, al principio de la intervención se descarga el forjado para que esté sometido únicamente a las cargas permanentes. Una vez finalizada la operación de refuerzo, si la conexión entre los dos elementos no es correcta cada elemento deberá resistir una parte de las sobrecargas de uso proporcionalmente a su rigidez a flexión, mientras que si la conexión es perfecta el esfuerzo se distribuye en toda la sección.

Por tanto, conviene realizar una unión encolada y clavada. Según la UNE-EN 1995-1-2, el encolado entre dos piezas de madera ha de realizarse con “adhesivos de fenol-formaldehído y aminoplásticos de tipo 1 de acuerdo con la Norma EN 301”. En cuanto a los clavos, se calculan siguiendo las indicaciones del apartado 8. *Uniones* CTE DB-SE-M.

Los resultados de los cálculos mecánicos y las disposiciones constructivas para los dos refuerzos expuestos pueden consultarse en el Anejo nº4.

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El presente Trabajo Fin de Máster tenía como principal objetivo el análisis de la resistencia al fuego del forjado de revoltones de ladrillos de un edificio histórico ubicado en la ciudad de Valencia.

En un primer tiempo, basándose en las instrucciones del Eurocódigo 1, Parte 1-2 : Acciones en estructuras expuestas al fuego, se han determinado los escenarios de fuego de cálculo a estudiar : el fuego normalizado ISO 834 y los fuegos paramétricos. La especificidad de los segundos es que se basan en las propiedades físicas del recinto para el cual se calculan. Aunque la curva normalizada parece ser la más conservadora al ser una función monótona creciente, se ha visto que en numerosos casos las curvas paramétricas presentan una fase de calentamiento más abrupta y una temperatura máxima mayor.

Además, se ha podido observar la influencia de la ventilación en las fases de calentamiento y enfriamiento.

Por un lado, en el caso del local B, los incendios correspondientes a las hipótesis de ventilación 1 y 3 se diferenciaban por la forma de su fase de calentamiento. El primero de ellos consideraba todas las puertas y ventanas abiertas mientras que el segundo consideraba una de las puertas cerradas. En estas condiciones, el fuego B1 venía controlado por el combustible, por lo que su fase de calentamiento duraba 20 minutos. Al contrario, el fuego B3 estaba condicionado por la ventilación y su fase de calentamiento se extendía hasta 29 minutos, alcanzado así temperaturas mayores.

Por otro lado, en el caso del local A, la fase de calentamiento era similar en las dos situaciones de ventilación ya que venía limitada por la disponibilidad de combustible. No obstante, las condiciones de ventilación del dormitorio han tenido un impacto en la fase de enfriamiento: la hipótesis de ventilación 1, que consideraba una ventilación mayor que la hipótesis 2, ocasionaba un enfriamiento más rápido.

En una segunda etapa, se ha calculado la evolución de la temperatura en el interior de las viguetas de madera. Para ello, se ha empleado SAFIR, programa de cálculo de estructuras en situación de incendio por el Método de los Elementos Finitos. Una vez obtenidos los campos de temperatura en las secciones, se ha podido comprobar que debido a la singularidad del forjado, la proposición de profundidades de carbonización del Eurocódigo 5, Parte 1-2 : Proyecto de estructuras sometidas al fuego no era de aplicación en el caso estudiado. De hecho, en la norma se dan velocidades de carbonización universales para las maderas de coníferas, sin considerar las propiedades térmicas específicas de la especie empleada.

Luego, a partir de los resultados de los cálculos térmicos, se han realizado los análisis mecánicos, contemplando tres métodos diferentes: los dos métodos simplificados de la UNE-EN 1995-1-2 y un método numérico mediante SAFIR. Esta manera de proceder ha permitido ver que los dos métodos simplificados propuestos por el Eurocódigo 5 proporcionaban resultados diferentes, el Método de la Sección Reducida siendo más desfavorable que el de las

Propiedades Reducidas. Además, se ha considerado una adaptación a la profundidad carbonizada, calibrada para un forjado de tipología muy similar, y se han obtenido resultados del mismo orden de magnitud entre los métodos simplificados y el cálculo informático (entre 2 y 4 minutos de diferencia).

De los análisis mecánicos se ha concluido que el forjado del local A no necesita refuerzo. Sin embargo, las viguetas de los recintos B y C no cumplen las exigencias del Código Técnico de la Edificación ya que se han obtenido tiempos de resistencia al fuego inferiores a 60 minutos. Por tanto, se ha decidido proceder al refuerzo de las mismas.

Para ello, se han expuesto cuatro soluciones de intervención. No obstante, la necesidad de resistir a la exposición al fuego de los elementos ha limitado las posibilidades aplicables al edificio estudiado y se ha optado por el aporte de elementos de madera en la cara inferior de las viguetas existentes, actuando así como madera “de sacrificio”. Además de satisfacer las exigencias del CTE, esta solución permite cumplir dos de los objetivos expuestos en la introducción del trabajo : se conserva la identidad visual del forjado de ladrillos de revoltones, perpetuando el patrimonio cultural propio a la Comunidad Valenciana, y se fomenta el trabajo de artesanos locales especializados en la restauración de edificios antiguos de madera.

Finalmente, se ha de comentar una serie de consideraciones adicionales. En primer lugar, respecto a la resistencia característica a flexión escogida para los elementos de madera, esta se ha extraído de la norma italiana UNI 11119, aplicable a las estructuras existentes. La resistencia de 12 MPa obtenida a partir de una clasificación puramente visual tiende a ser muy conservadora en comparación con las características reales de las viguetas. En efecto, si los elementos de madera no han sufrido ataques bióticos durante su vida útil, su resistencia a flexión no tiene por qué alejarse de la resistencia característica de las maderas de clase C18, es decir 18 MPa. Se ha de esperar que si se hubiese considerado dicha resistencia a flexión, se cumplirían los objetivos de resistencia al fuego durante 60 minutos sin necesidad de refuerzo. Por otra parte, considerando que el presente edificio tiene uso residencial, se ha realizado los cálculos de manera que el forjado resistiese durante una hora. No obstante, la tipología de forjado de revoltones de ladrillos es muy común en los edificios destinados a viviendas unifamiliares, los cuales requieren un tiempo de resistencia al fuego de 30 minutos. Se ha podido ver que esta exigencia hubiera sido satisfecha sin necesidad de refuerzo tampoco.

Como líneas de trabajo posterior al presente TFM, se puede proponer :

- Establecer modelos experimentales y numéricos para calibrar las propiedades térmicas de la madera sometida a fuegos naturales, y no exclusivamente al fuego normalizado ISO 834.
- Adaptar los métodos simplificados de los Eurocódigos a los elementos de geometría singular o, en caso de no ser posible, desarrollar modelos adaptados a la tipología de los forjados de revoltones ya que su rehabilitación va a ser más presente en el futuro.

-
- Estudiar la aplicabilidad del prometedor refuerzo mediante sistemas FRP a estructuras de madera sometidas a temperaturas elevadas y proponer alternativas a los métodos de ejecución actuales.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Naciones Unidas (Ed.). (2014). *The world population situation in 2014: A concise report*. United Nations.
- [2] United Nations. (2020). *World Population Prospects 2019 - Volume II: Demographic Profiles*. UN. <https://doi.org/10.18356/7707d011-en>
- [3] Vegas, F., & Mileto, C. (2011). *Aprenienddo a restaurar: Un manual de restauración de la arquitectura tradicional de la Comunidad Valenciana*. COACV, Col·legi d'Arquitectes de la Comunitat Valenciana.
- [4] Ministerio de Vivienda. (2006). *Código Técnico de la Edificación*.
- [5] Fundación MAPFRE & APTB. (2020). *Victimas de incendios en España en 2019*.
- [6] Diodato, M., Macchioni, N., Brunetti, M., Pizzo, B., Nocetti, M., Burato, P., Sozzi, L., Pecoraro, E., López-Manzanares, F. V., & Mileto, C. (2015). Understanding Spanish Timber Jack Arch Floors: Examples of Assessment and Conservation Issues. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(6), 641-654. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1041193>
- [7] Diodato, M. (s. f.). *Huellas de artesanía constructiva. Características de los forjados históricos de Valencia*. 10.
- [8] ORDEN de 7 de diciembre de 2009, de la Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, por la que se aprueban las condiciones de diseño y calidad en desarrollo del Decreto 151/2009 de 2 de octubre, del Consell. https://dogv.gva.es/datos/2009/12/18/pdf/2009_14535.pdf
- [9] Robinet, T., & Signoret, J. (2015). *Résistance au feu des structures bois* [Université de Lorraine]. hal-01834357.
- [10] Blasco Miguel, J. (2015). El buen comportamiento de la madera frente al fuego. *Quaderns d'Estructures*, 54.
- [11] Vignote Peña, S. (2014). *PRINCIPALES MADERAS DE CONÍFERAS EN ESPAÑA CARACTERÍSTICAS, TECNOLOGÍA Y APLICACIONES*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.13140/2.1.3249.0883>
- [12] Universidad de Buenos Aires. (s. f.). *Apuntes de la asignatura Transferencia de Calor y Masa*.
- [13] *CAT-EC-v06.3_marzo_10.pdf*. (s. f.). Recuperado 30 de agosto de 2021, de https://www.codigotecnico.org/pdf/Programas/CEC/CAT-EC-v06.3_marzo_10.pdf
- [14] Zürcher, C., Frank, T., & Zürcher, C. (2014). *Physique du bâtiment construction et énergie*.
- [15] *Analysis of the fire resistance of timber jack arch flooring systems used in historical buildings | Elsevier Enhanced Reader*. (s. f.). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112679>
- [16] University of Liège. Fire Safety Engineering. (2015). *SAFIR. Capabilities and examples of applications*.
- [17] Richter F, Kotsovinos P, Rackauskaite E, Rein G. Thermal response of timber slabs exposed to travelling fires and traditional design fires. *Fire Technol* 2021;57: 393–414. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01000-1>.

-
- [18] Kasal, B., & Yan, L. (2021). Fiber-Reinforced Polymers as Reinforcement for Timber Structural Elements. En J. Branco, P. Dietsch, & T. Tannert (Eds.), *Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures* (Vol. 33, pp. 51-78). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67794-7_4
- [19] Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., Bobadilla, I., & García, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

Anejo nº1 – Obtención de las curvas paramétricas tiempo-temperatura

CARACTERÍSTICAS GENERALES

PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

Propiedad térmica	Ladrillo	Yeso	Baldosas cerámicas	Madera	Mortero de cal
Densidad ρ (kg/m ³)	1800	800	2300	575	1900
Calor específico c (J/kg·K)	840	1000	840	1530	1000
Conductividad térmica l (W/m·K)	0,42	0,25	1,3	0,12	1,3
Coefficiente b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	796,89	447,21	1584,80	324,92	1571,62

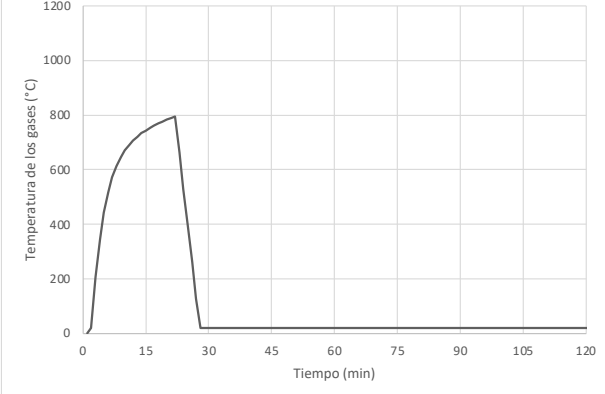
COEFICIENTE B DE LOS ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE

Elemento	Designación	Dimensión (cm)	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)
Forjado	Anchos tributarios	70	695,76
Madera		15	324,92
Ladrillos		55	796,89
Muro exterior	s	1,5	447,21
Yeso	s ₁	1,5	447,21
Ladrillos	s ₂	38,5	796,89
Muro interior	s	1,5	447,21
Yeso	s ₁	1,5	447,21
Ladrillos	s ₂	18,5	796,89
Tabiquería			447,21
Yeso			447,21
Suelo		6,5	1584,80
Baldosas cerámicas		6,5	1584,80

CURVA PARAMÉTRICA A1

Local A, hipótesis de ventilación 1				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas					
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Abierto Cerrado	A _j (m ²)
Suelo	Suelo	1584,80	7,0	-					7,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	7,7	-					7,72
Pared 2	Muro interior	447,21	8,4	Puerta	2,15	0,83	1,77	Abierto	6,62
Pared 3	Muro interior	447,21	8,5	-					8,53
Pared 4	Muro exterior	447,21	8,4	Puerta-ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	5,97
Forjado	Forjado	695,76	7,0	-					7,00
TOTAL		673,68	47,00		2,21		4,16		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,131 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 32,02$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 534,6 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 79,61 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,024 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 1,06$</p> <p>$t_{max}^* = 0,352 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 795,6^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 3,878 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 2,752$</p>
--	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,212 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-1,802 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-20,14 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 26 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 795,6 - 250 \cdot (t^* - 10,672)$	
--	--

CURVA PARAMÉTRICA A2

Local A, hipótesis de ventilación 2				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas					
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Abierto Cerrado	A _j (m ²)
Suelo	Suelo	1584,80	7,0	-					7,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	7,7	-					7,72
Pared 2	Muro interior	447,21	8,4	Puerta	2,15	0,83	1,77	Cerrado	8,40
Pared 3	Muro interior	447,21	8,5	-					8,53
Pared 4	Muro exterior	447,21	8,4	Puerta-ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	5,97
Forjado	Forjado	695,76	7,0	-					7,00
TOTAL		664,68	47,00		2,25		2,39		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

Parámetros para la fase de calentamiento

Coefficiente de abertura : $O = 0,076 \text{ m}^{1/2}$
Factor tiempo : $\Gamma = 11,03$

Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 534,6 \text{ MJ/m}^2$

Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 79,61 \text{ MJ/m}^2$

Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$
 $t_{max} = 0,333 \text{ h}$

$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible

Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,024 \text{ m}^{1/2}$
Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 1,09$

$t_{max}^* = 0,362 \text{ h}$
 $\Theta_{max} = 798,9^\circ\text{C}$

Parámetros para la fase de enfriamiento

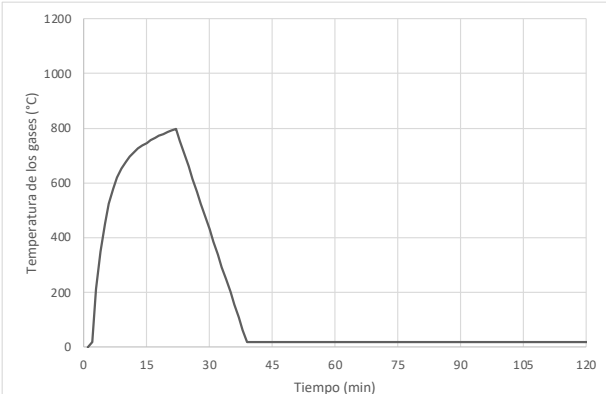
$t_{max}^* = 2,307 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$
 $x = 1,593$

Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$

$$\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,218 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-1,853 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-20,71 \cdot t})$$

Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 37 \text{ min.}$

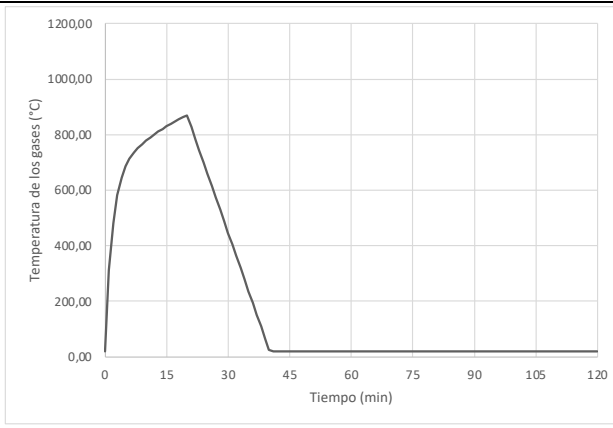
$$\Theta_g = 798,9 - 250 \cdot (t^* - 3,675)$$



CURVA PARAMÉTRICA B1

Local B, hipótesis de ventilación 1				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas					A _j (m ²)
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Abierto Cerrado	
Suelo	Suelo	1584,80	16,0	-					16,00
Pared 1	Muro exterior	447,21	20,1	-					20,06
Pared 2	Muro exterior	447,21	8,5	Ventana	1,20	1,04	1,25	Abierto	7,29
Pared 3	Tabiquería	447,21	20,1	Puerta	2,15	0,83	1,78	Abierto	18,29
Pared 4	Tabiquería	447,21	8,5	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	6,47
Forjado	Forjado	695,76	16,0	-					16,00
TOTAL		710,91	89,14		1,91		5,03		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,078 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 10,15$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 617,1 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 110,77 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,033 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 1,84$</p> <p>$t_{max}^* = 0,613 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 869,8^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 2,880 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 1,175$</p>
---	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,368 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-3,128 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-34,96 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 41 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 869,8 - 250 \cdot (t^* - 3,384)$	
---	--

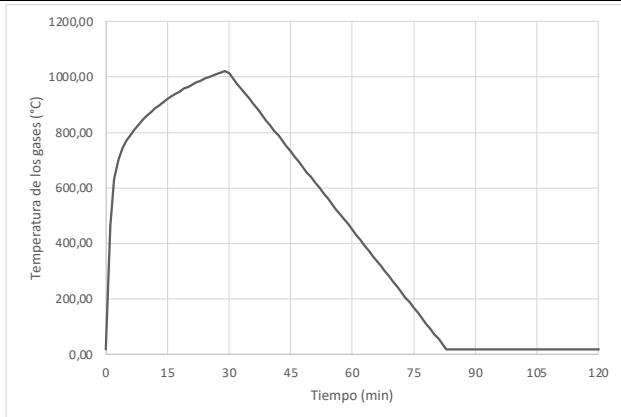
CURVA PARAMÉTRICA B2

Local B, hipótesis de ventilación 2				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas					
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Abierto Cerrado	A _j (m ²)
Suelo	Suelo	1584,80	16,0	-					16,00
Pared 1	Muro exterior	447,21	20,1	-					20,06
Pared 2	Muro exterior	447,21	8,5	Ventana	1,20	1,04	1,25	Abierto	7,29
Pared 3	Tabiquería	447,21	20,1	Puerta	2,15	0,83	1,78	Cerrado	2à,08
Pared 4	Tabiquería	447,21	8,5	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	8,47
Forjado	Forjado	695,76	16,0	-					16,00
TOTAL		699,55	89,14		1,20		1,25		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		
Parámetros para la fase de calentamiento Coeficiente de abertura : $O = 0,015 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma =$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} =$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} =$ Tiempo límite : $t_{lim} =$ $t_{max} =$ Coeficiente de abertura límite : $O_{lim} =$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} =$ $t_{max}^* =$ $\Theta_{max} =$					Parámetros para la fase de enfriamiento $t_{max}^* =$ $x =$				

CURVA PARAMÉTRICA B3

Local B, hipótesis de ventilación 3				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas					A _j (m ²)
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Abierto Cerrado	
Suelo	Suelo	1584,80	16,0	-					16,00
Pared 1	Muro exterior	447,21	20,1	-					20,06
Pared 2	Muro exterior	447,21	8,5	Ventana	1,20	1,04	1,25	Abierto	7,29
Pared 3	Tabiquería	447,21	20,1	Puerta	2,15	0,83	1,78	Abierto	18,29
Pared 4	Tabiquería	447,21	8,5	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	8,47
Forjado	Forjado	695,76	16,0	-					16,00
TOTAL		704,78	89,14		1,76		3,03		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,045 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 3,45$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 617,1 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 110,77 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,491 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} > t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por la ventilación</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} =$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} =$</p> <p>$t_{max}^* = 1,693 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 1023,8^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 1,692 \text{ h} \in (0,5; 2) \text{ h}$ $x = 0,679$</p>
--	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 29 \text{ min.} 28 \text{ sec.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,69 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-5,865 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-65,55 \cdot t})$ <p>Para $29 \text{ min.} 28 \text{ sec.} \leq t \leq 83 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 1023,8 - 250 \cdot (3 - 1,692) \cdot (t^* - 1,149)$	
---	--

CURVA PARAMÉTRICA B4

Local B, hipótesis de ventilación 4				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas					A _j (m ²)
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Abierto Cerrado	
Suelo	Suelo	1584,80	16,0	-					16,00
Pared 1	Muro exterior	447,21	20,1	-					20,06
Pared 2	Muro exterior	447,21	8,5	Ventana	1,20	1,04	1,25	Abierto	7,29
Pared 3	Tabiquería	447,21	20,1	Puerta	2,15	0,83	1,78	Cerrado	20,08
Pared 4	Tabiquería	447,21	8,5	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	6,47
Forjado	Forjado	695,76	16,0	-					16,00
TOTAL		705,43	89,14		1,78		3,25		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

Parámetros para la fase de calentamiento

Coefficiente de abertura : $O = 0,049 \text{ m}^{1/2}$
Factor tiempo : $\Gamma = 4,00$

Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 617,1 \text{ MJ/m}^2$

Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 110,77 \text{ MJ/m}^2$

Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$
 $t_{max} = 0,455 \text{ h}$

$t_{max} > t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por la ventilación

Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} =$
Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} =$

$t_{max}^* = 1,822 \text{ h}$
 $\Theta_{max} = 1034,6^\circ\text{C}$

Parámetros para la fase de enfriamiento

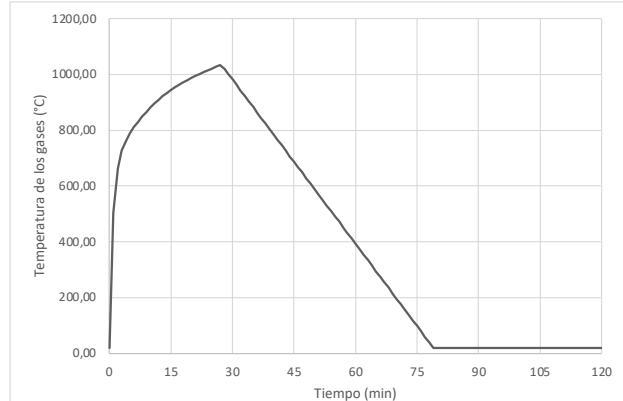
$t_{max}^* = 1,822 \text{ h} \in (0,5; 2) \text{ h}$
 $x = 0,732$

Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 27 \text{ min. } 19 \text{ sec.}$

$$\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,8 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-6,8 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-76 \cdot t})$$

Para $27 \text{ min. } 19 \text{ sec.} \leq t \leq 79 \text{ min.}$

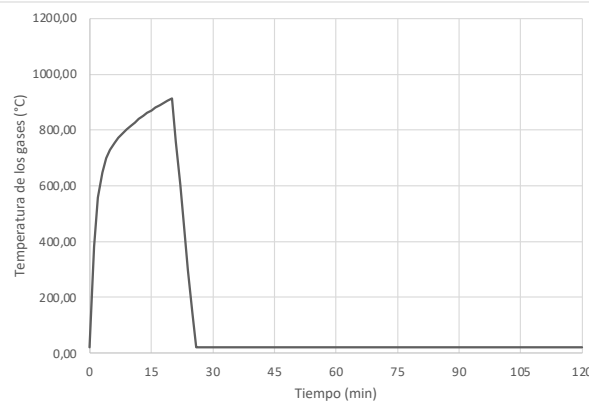
$$\Theta_g = 1023,8 - 250 \cdot (3 - 1,822) \cdot (t^* - 1,333)$$



CURVA PARAMÉTRICA C1

Local C, hipótesis de ventilación 2				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas				A _j (m ²)	
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Abierto Cerrado
Suelo	Suelo	1584,80	25,0	-			0,00		25,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	3,6	-			0,00		3,64
Pared 2	Tabiquería	447,21	4,7	Puerta	2,15	0,83	1,78	Abierto	2,87
Pared 3	Tabiquería	447,21	12,9	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	10,93
Pared 4	Muro exterior	447,21	17,6	Puerta- ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	15,21
Pared 5	Muro exterior	447,21	17,1	2 Puertas- ventanas	2,25	1,06	2,39	Abierto	12,29
Pared 6	Tabiquería	447,21	11,7	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	9,70
Forjado	Forjado	695,76	25,0	-			0,00		25,00
TOTAL		778,40	117,57		2,21		12,94		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

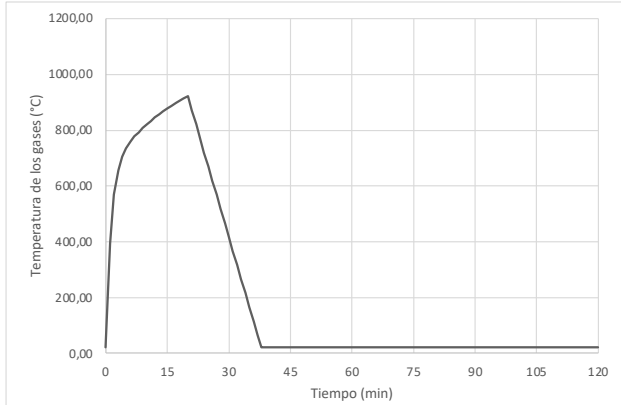
<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,163 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 37,07$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 661,7 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 140,70 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,042 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 2,47$</p> <p>$t_{max}^* = 0,824 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 914,4^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 6,383 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 1,936$</p>
---	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,494 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-4,199 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-46,93 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 26 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 914,4 - 250 \cdot (t^* - 12,357)$	
--	--

CURVA PARAMÉTRICA C2

Local C, hipótesis de ventilación 2				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas				A _j (m ²)	
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Abierto Cerrado
Suelo	Suelo	1584,80	25,0	-			0,00		25,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	3,6	-			0,00		3,64
Pared 2	Tabiquería	447,21	4,7	Puerta	2,15	0,83	1,78	Cerrado	2,87
Pared 3	Tabiquería	447,21	12,9	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	10,93
Pared 4	Muro exterior	447,21	17,6	Puerta- ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	15,21
Pared 5	Muro exterior	447,21	17,1	2 Puertas- ventanas	2,25	1,06	2,39	Abierto	12,29
Pared 6	Tabiquería	447,21	11,7	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	9,70
Forjado	Forjado	695,76	25,0	-			0,00		25,00
TOTAL		761,05	117,57		2,25		7,16		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,091 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 12,10$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 661,7 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 140,70 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,042 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 2,59$</p> <p>$t_{max}^* = 0,862 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 921,3^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 3,730 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 1,081$</p>
---	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,518 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-4,403 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-49,21 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 38 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 921,3 - 250 \cdot (t^* - 4,032)$	
---	--

CURVA PARAMÉTRICA C3

Local C, hipótesis de ventilación 3				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas				A _j (m ²)	
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Abierto Cerrado
Suelo	Suelo	1584,80	25,0	-			0,00		25,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	3,6	-			0,00		3,64
Pared 2	Tabiquería	447,21	4,7	Puerta	2,15	0,83	1,78	Abierto	2,87
Pared 3	Tabiquería	447,21	12,9	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	12,93
Pared 4	Muro exterior	447,21	17,6	Puerta- ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	15,21
Pared 5	Muro exterior	447,21	17,1	2 Puertas- ventanas	2,25	1,06	2,39	Abierto	12,29
Pared 6	Tabiquería	447,21	11,7	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	11,70
Forjado	Forjado	695,76	25,0	-			0,00		25,00
TOTAL		766,21	117,57		2,23		8,94		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,114 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 18,47$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 661,7 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 140,70 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,042 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 2,55$</p> <p>$t_{max}^* = 0,851 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 919,2^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 4,577 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 1,345$</p>
---	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,51 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-4,335 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-48,45 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 32 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 919,2 - 250 \cdot (t^* - 6,156)$	
--	--

CURVA PARAMÉTRICA C4

Local C, hipótesis de ventilación 4				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas				A _j (m ²)	
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Abierto Cerrado
Suelo	Suelo	1584,80	25,0	-			0,00		25,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	3,6	-			0,00		3,64
Pared 2	Tabiquería	447,21	4,7	Puerta	2,15	0,83	1,78	Abierto	2,87
Pared 3	Tabiquería	447,21	12,9	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	12,93
Pared 4	Muro exterior	447,21	17,6	Puerta- ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	15,21
Pared 5	Muro exterior	447,21	17,1	2 Puertas- ventanas	2,25	1,06	2,39	Abierto	12,29
Pared 6	Tabiquería	447,21	11,7	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	9,70
Forjado	Forjado	695,76	25,0	-			0,00		25,00
TOTAL		772,19	117,57		2,22		10,94		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

Parámetros para la fase de calentamiento

Coefficiente de abertura : $O = 0,138 \text{ m}^{1/2}$
Factor tiempo : $\Gamma = 27,05$

Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo
construida : $q_{f,d} = 661,7 \text{ MJ/m}^2$

Valor de la carga de fuego referida a la superficie total :
 $q_{t,d} = 140,70 \text{ MJ/m}^2$

Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$
 $t_{max} = 0,333 \text{ h}$

$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible

Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,042 \text{ m}^{1/2}$
Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 2,51$

$t_{max}^* = 0,838 \text{ h}$
 $\Theta_{max} = 916,8^\circ\text{C}$

Parámetros para la fase de enfriamiento

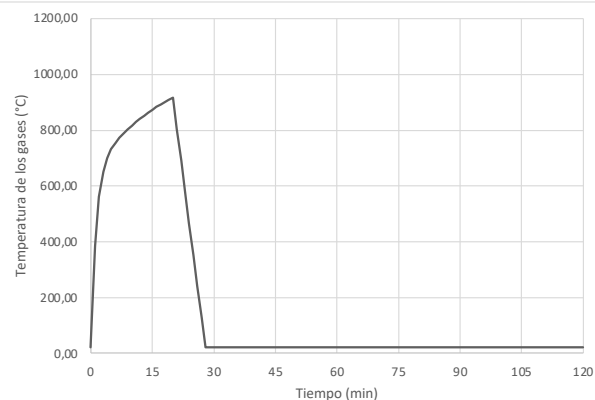
$t_{max}^* = 5,496 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$
 $x = 1,640$

Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$

$$\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,502 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-4,267 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-47,69 \cdot t})$$

Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 28 \text{ min.}$

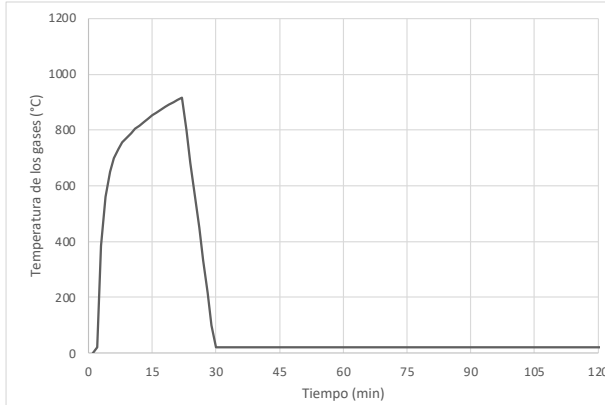
$$\Theta_g = 916,8 - 250 \cdot (t^* - 9,013)$$



CURVA PARAMÉTRICA C5

Local C, hipótesis de ventilación 5				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas				A _j (m ²)	
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Abierto Cerrado
Suelo	Suelo	1584,80	25,0	-			0,00		25,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	3,6	-			0,00		3,64
Pared 2	Tabiquería	447,21	4,7	Puerta	2,15	0,83	1,78	Cerrado	4,66
Pared 3	Tabiquería	447,21	12,9	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	10,93
Pared 4	Muro exterior	447,21	17,6	Puerta- ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	15,21
Pared 5	Muro exterior	447,21	17,1	2 Puertas- ventanas	2,25	1,06	2,39	Abierto	12,29
Pared 6	Tabiquería	447,21	11,7	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	9,70
Forjado	Forjado	695,76	25,0	-			0,00		25,00
TOTAL		772,85	117,57		2,21		11,15		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

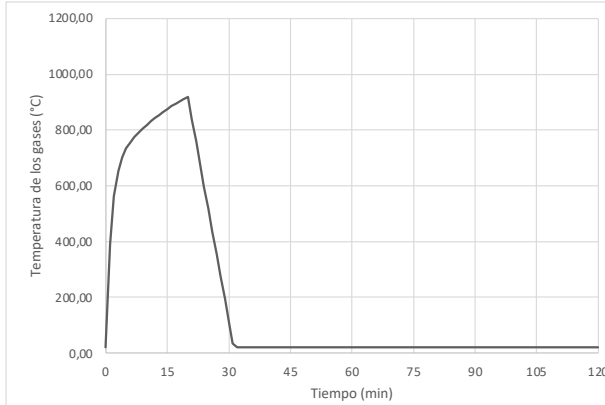
<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,141 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 28,06$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 661,7 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 140,70 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,042 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 2,51$</p> <p>$t_{max}^* = 0,836 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 916,6^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 5,593 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 1,672$</p>
---	---

<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,502 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-4,267 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-47,69 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 26 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 916,6 - 250 \cdot (t^* - 9,351)$	
---	--

CURVA PARAMÉTRICA C6

Local C, hipótesis de ventilación 6				Altura : 3,4 m					
Elemento	Envolvente			Aberturas				A _j (m ²)	
	Tipo	b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	Área (m ²)	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)	Área (m ²)		Abierto Cerrado
Suelo	Suelo	1584,80	25,0	-			0,00		25,00
Pared 1	Tabiquería	447,21	3,6	-			0,00		3,64
Pared 2	Tabiquería	447,21	4,7	Puerta	2,15	0,83	1,78	Cerrado	4,66
Pared 3	Tabiquería	447,21	12,9	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Cerrado	12,93
Pared 4	Muro exterior	447,21	17,6	Puerta- ventana	2,25	1,06	2,39	Abierto	15,21
Pared 5	Muro exterior	447,21	17,1	2 Puertas- ventanas	2,25	1,06	2,39	Abierto	12,29
Pared 6	Tabiquería	447,21	11,7	Puerta corredora	2,15	0,93	2,00	Abierto	9,70
Forjado	Forjado	695,76	25,0	-			0,00		25,00
TOTAL		766,84	117,57		2,23		9,15		
		b (J/m ² ·s ^{1/2} ·K)	A _t (m ²)		h _{eq} (m)		A _v (m ²)		

<p>Parámetros para la fase de calentamiento</p> <p>Coefficiente de abertura : $O = 0,116 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo : $\Gamma = 19,32$</p> <p>Valor de la carga de fuego referida a la superficie de suelo construida : $q_{f,d} = 661,7 \text{ MJ/m}^2$ Valor de la carga de fuego referida a la superficie total : $q_{t,d} = 140,70 \text{ MJ/m}^2$</p> <p>Tiempo límite : $t_{lim} = 0,333 \text{ h}$ $t_{max} = 0,333 \text{ h}$</p> <p>$t_{max} = t_{lim} \rightarrow$ Fuego controlado por combustible</p> <p>Coefficiente de abertura límite : $O_{lim} = 0,042 \text{ m}^{1/2}$ Factor tiempo límite : $\Gamma_{lim} = 2,55$</p> <p>$t_{max}^* = 0,849 \text{ h}$ $\Theta_{max} = 919,0^\circ\text{C}$</p>	<p>Parámetros para la fase de enfriamiento</p> <p>$t_{max}^* = 4,677 \text{ h} \geq 2 \text{ h}$ $x = 1,377$</p>
---	---

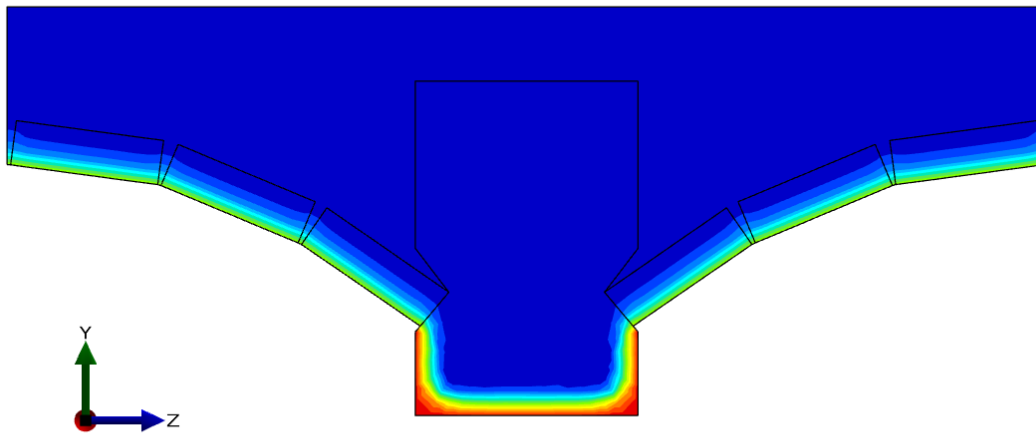
<p>Para $0 \text{ min.} \leq t \leq 20 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,51 \cdot t} - 0,204 \cdot e^{-4,335 \cdot t} - 0,472 \cdot e^{-48,45 \cdot t})$ <p>Para $20 \text{ min.} \leq t \leq 32 \text{ min.}$</p> $\Theta_g = 919,0 - 250 \cdot (t^* - 6,440)$	
--	--

TRABAJO FIN DE MÁSTER

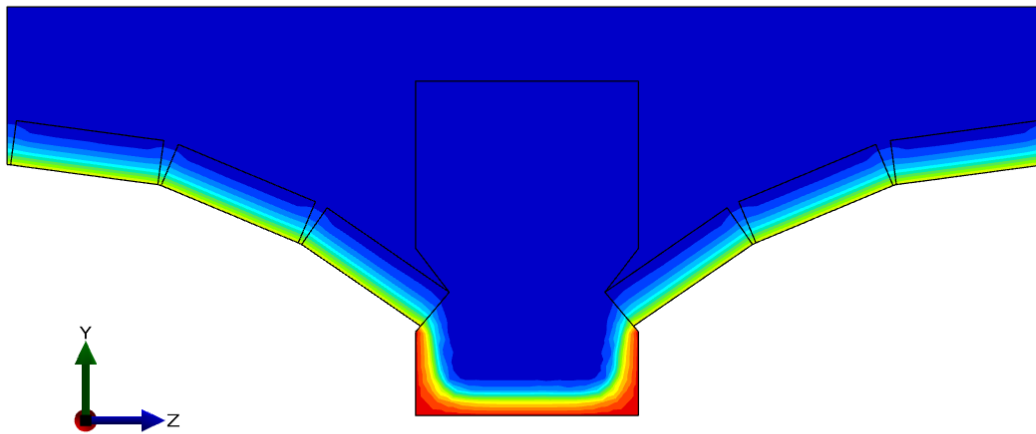
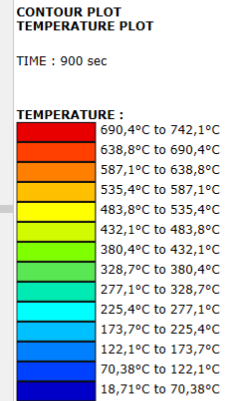
Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

Anejo nº2 – Resultados de los análisis térmicos

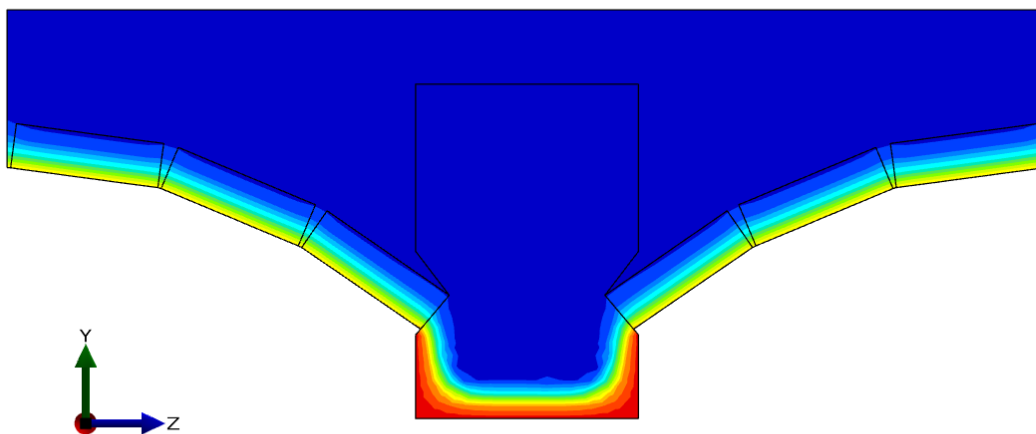
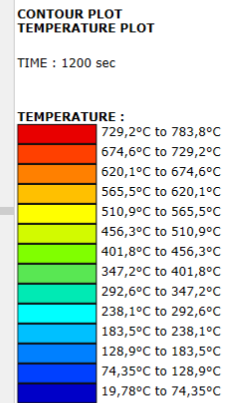
FUEGO NORMALIZADO ISO 834



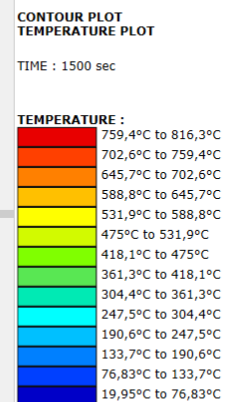
t=15 minutos

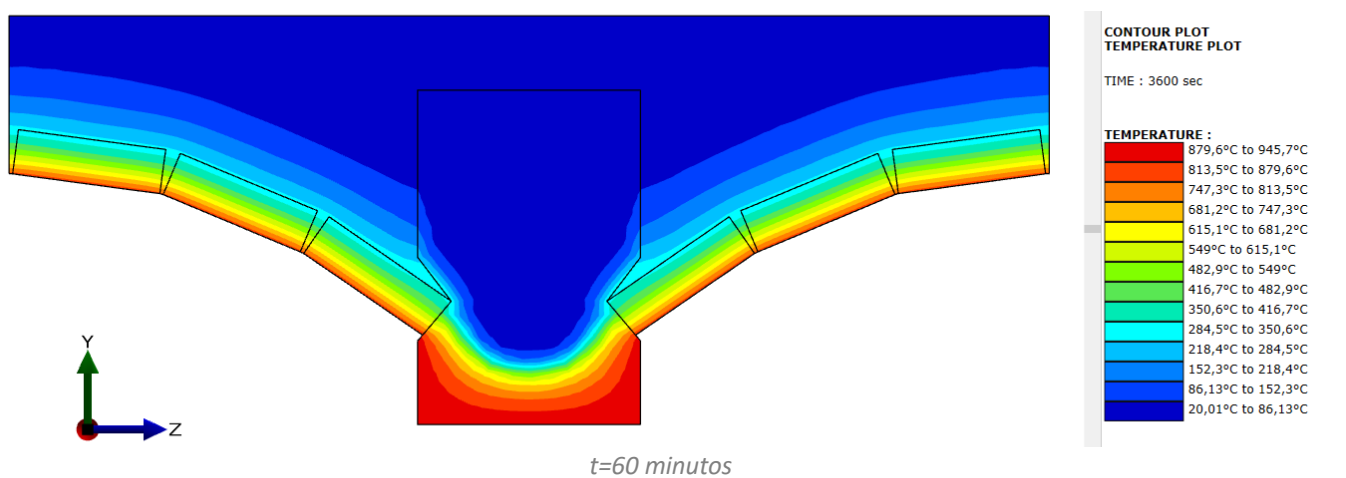
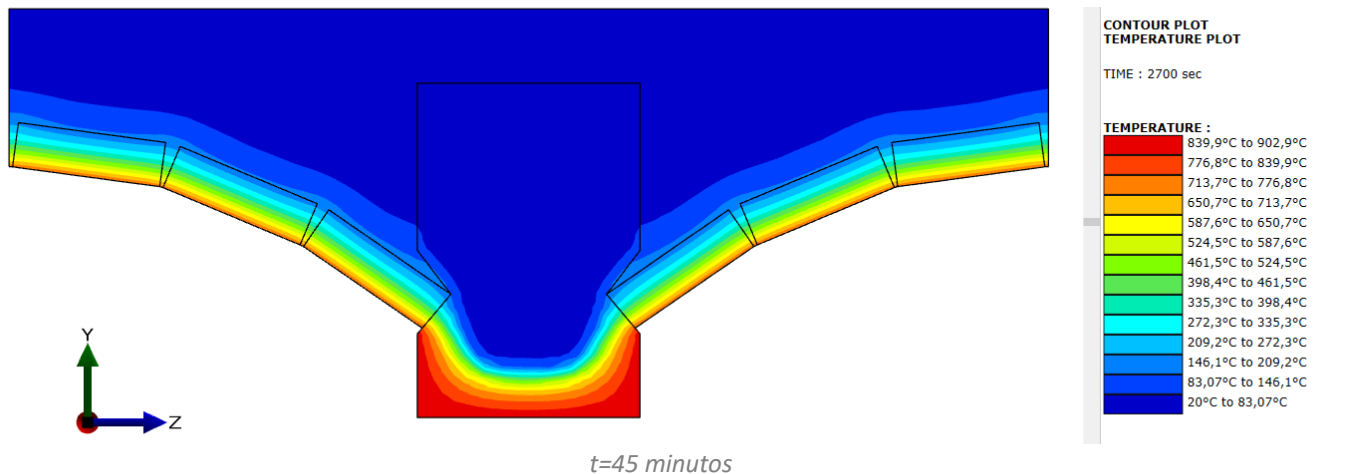


t=20 minutos

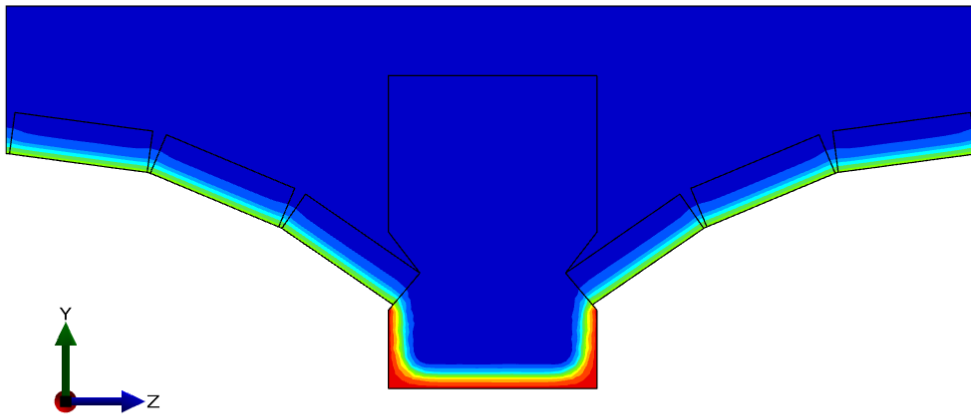


t=30 minutos





CURVA PARAMÉTRICA A1

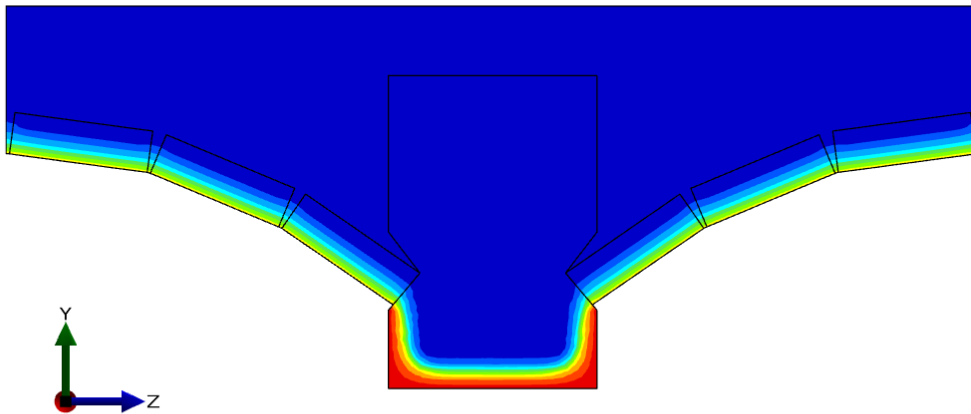
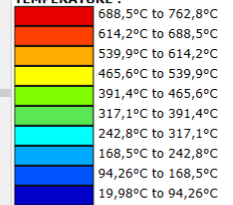


t=15 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 900 sec

TEMPERATURE :

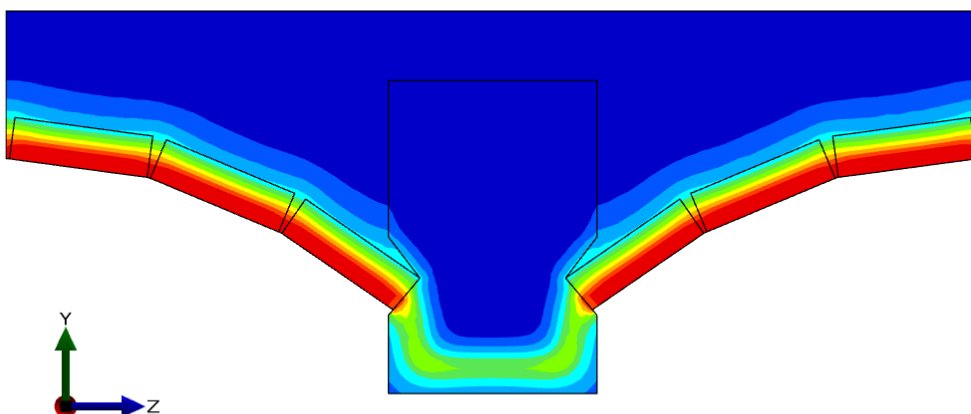
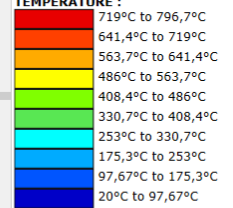


t=20 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1200 sec

TEMPERATURE :

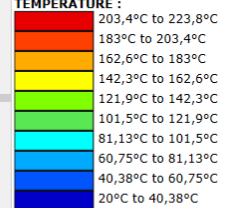


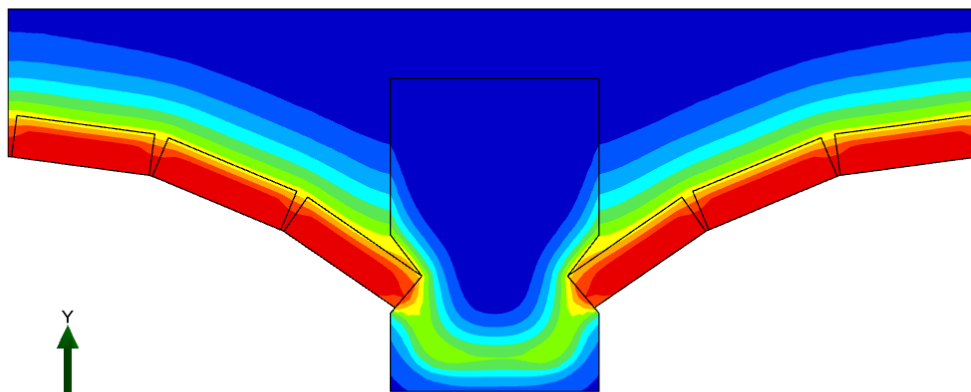
t=30 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1800 sec

TEMPERATURE :



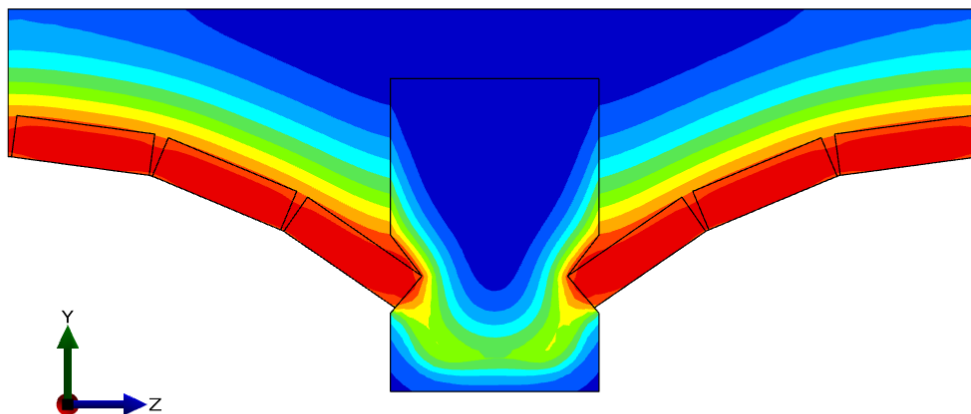
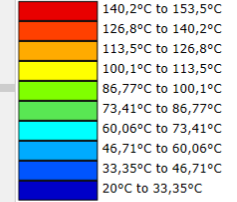


t=45 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 2700 sec

TEMPERATURE :

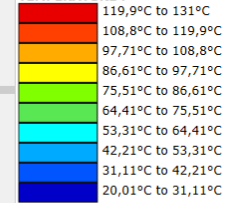


t=60 minutos

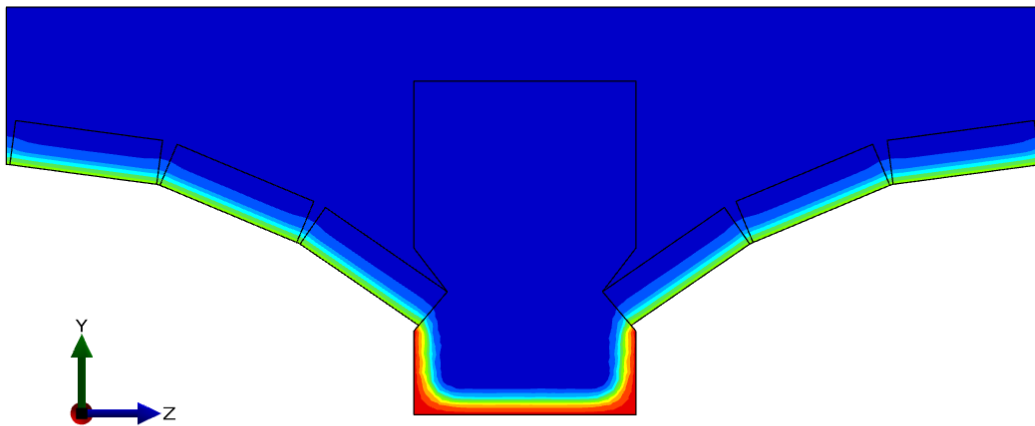
CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 3600 sec

TEMPERATURE :



CURVA PARAMÉTRICA A2

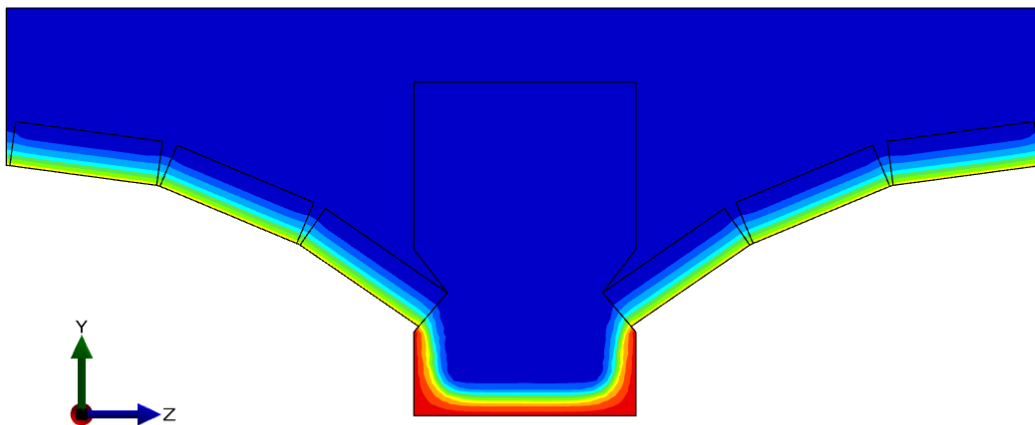
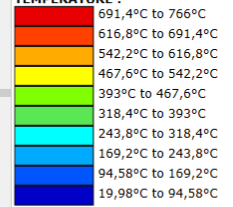


t=15 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 900 sec

TEMPERATURE :

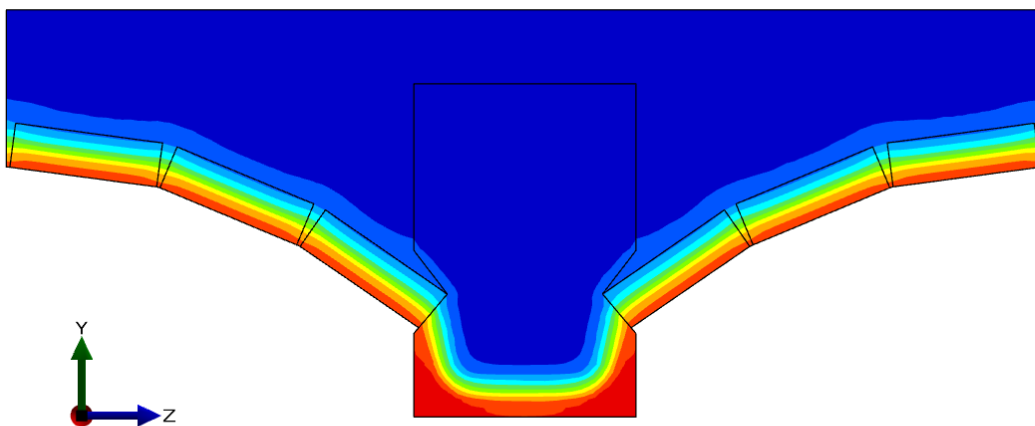
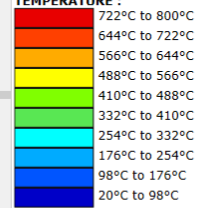


t=20 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1200 sec

TEMPERATURE :

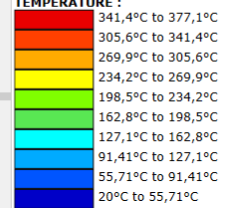


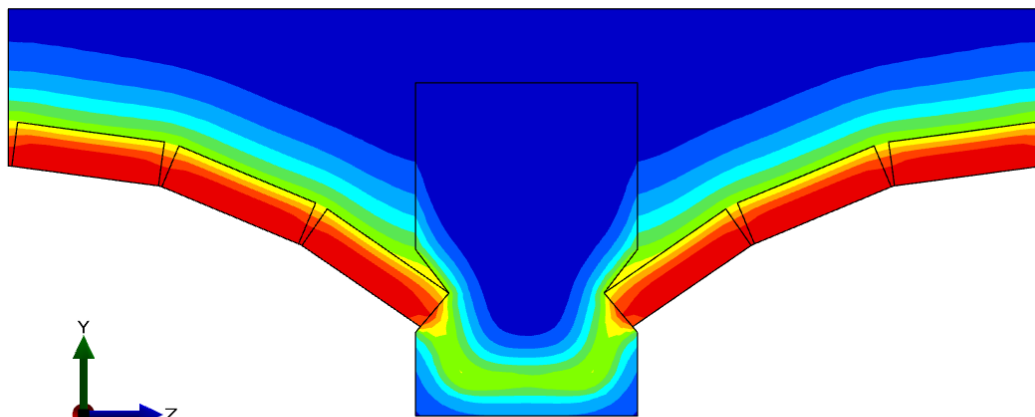
t=30 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1800 sec

TEMPERATURE :

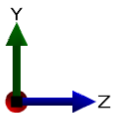
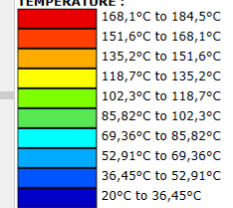




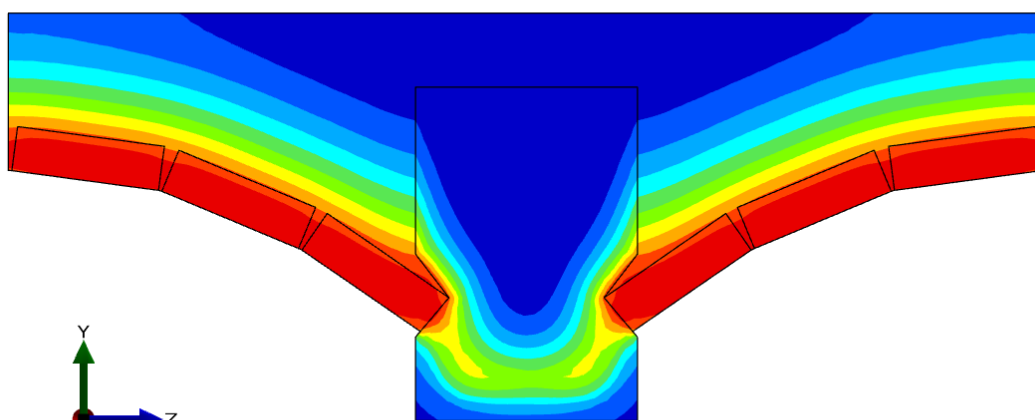
CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 2700 sec

TEMPERATURE :



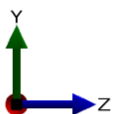
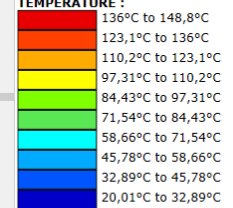
t=45 minutos



CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

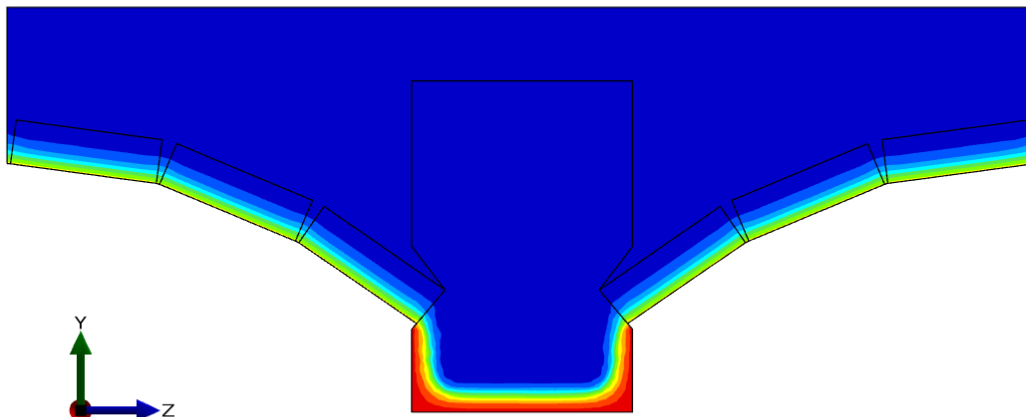
TIME : 3600 sec

TEMPERATURE :



t=60 minutos

CURVA PARAMÉTRICA B1

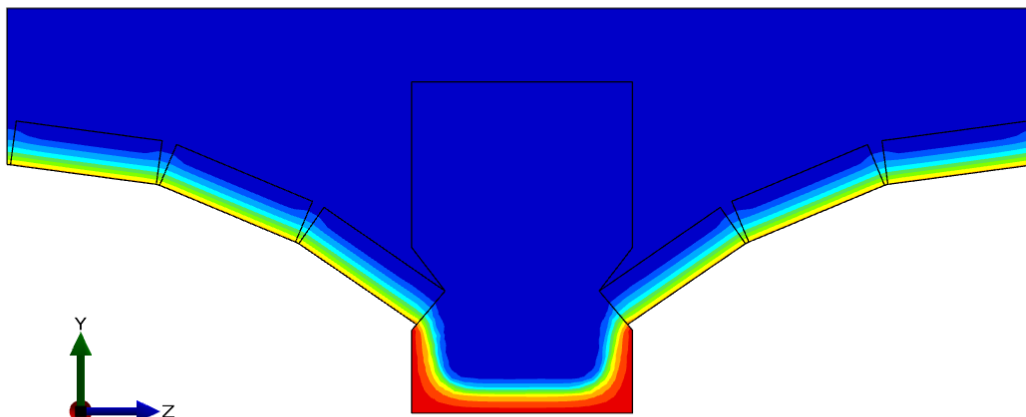
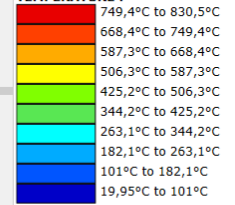


t=15 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 900 sec

TEMPERATURE :

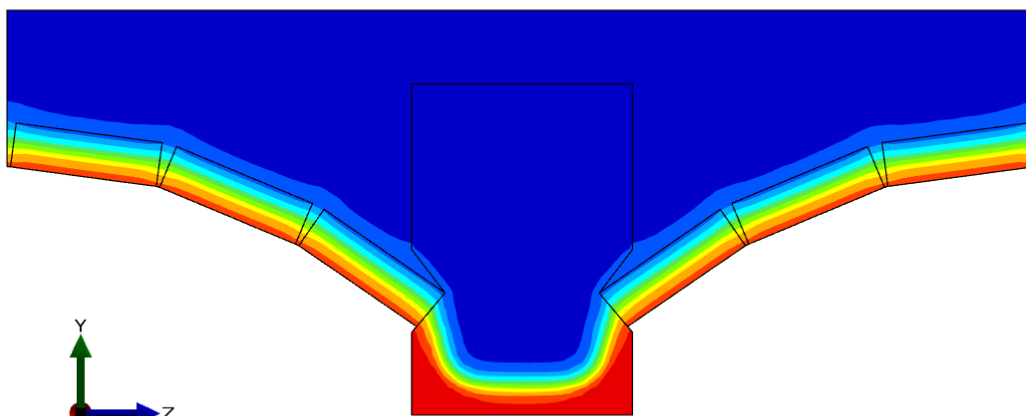
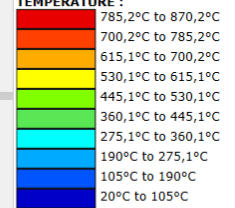


t=20 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1200 sec

TEMPERATURE :

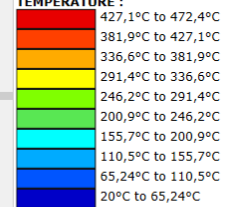


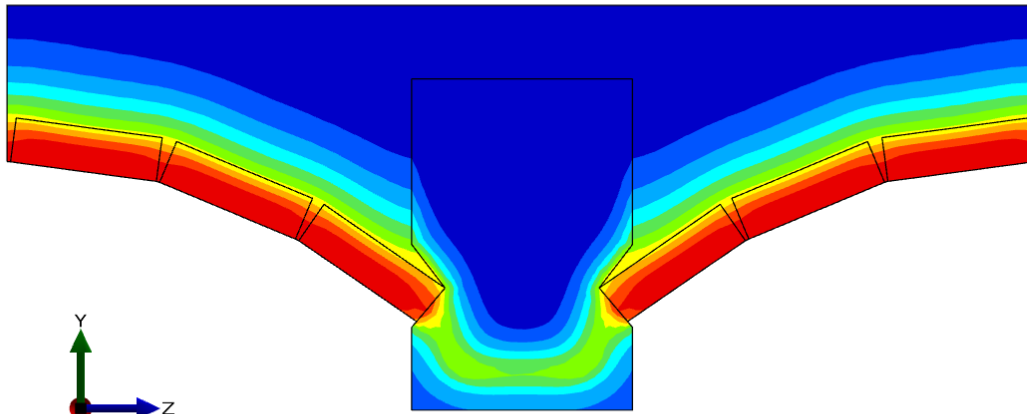
t=30 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1800 sec

TEMPERATURE :



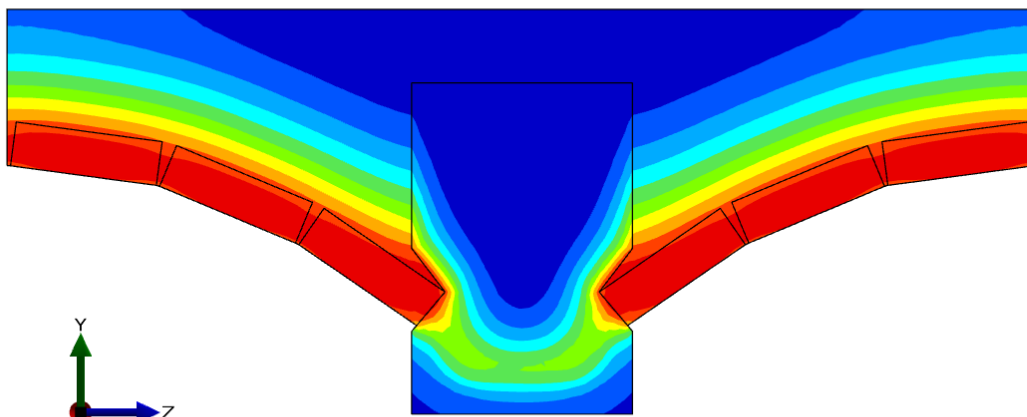
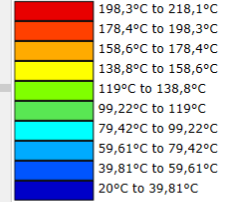


t=45 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 2700 sec

TEMPERATURE :

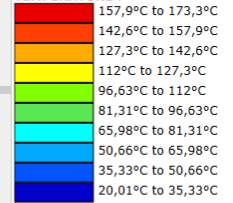


t=60 minutos

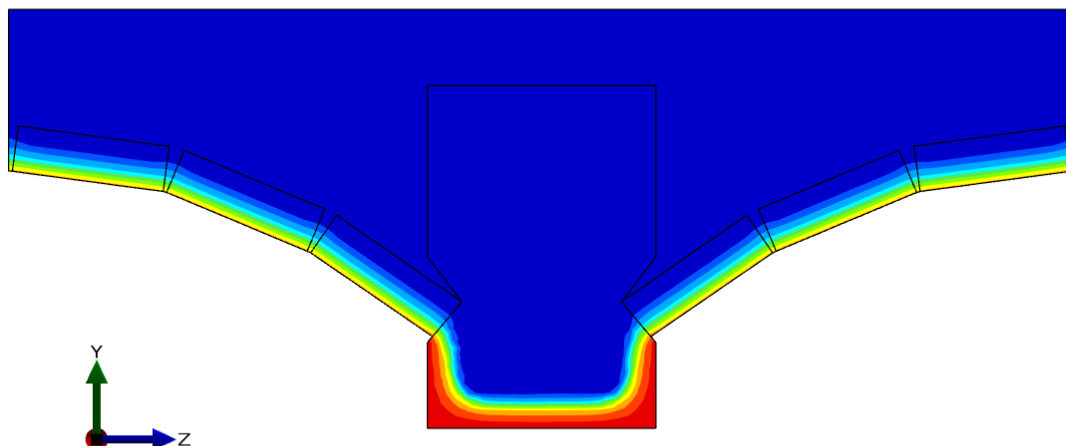
CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 3600 sec

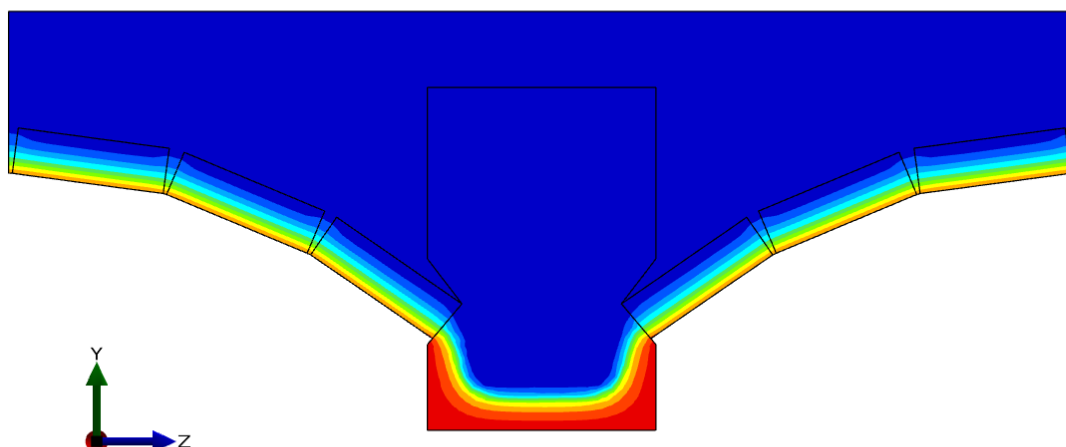
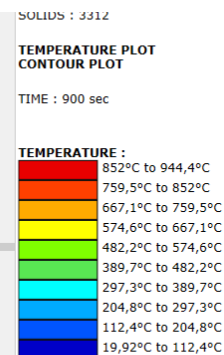
TEMPERATURE :



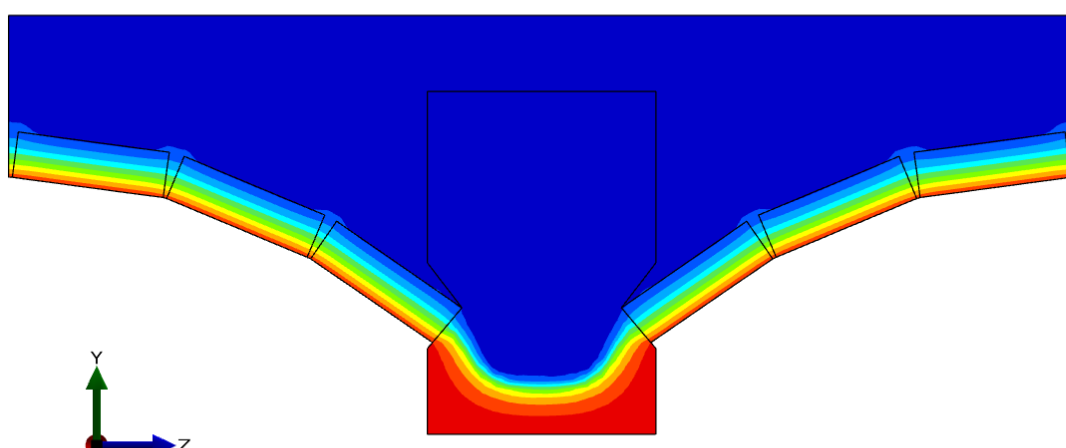
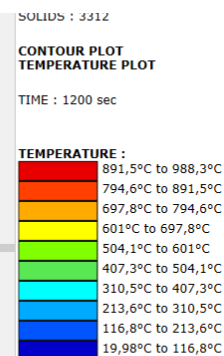
CURVA PARAMÉTRICA B4



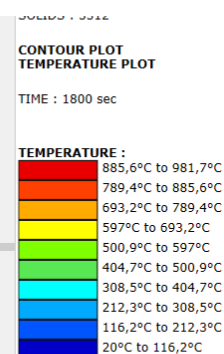
t=15 minutos

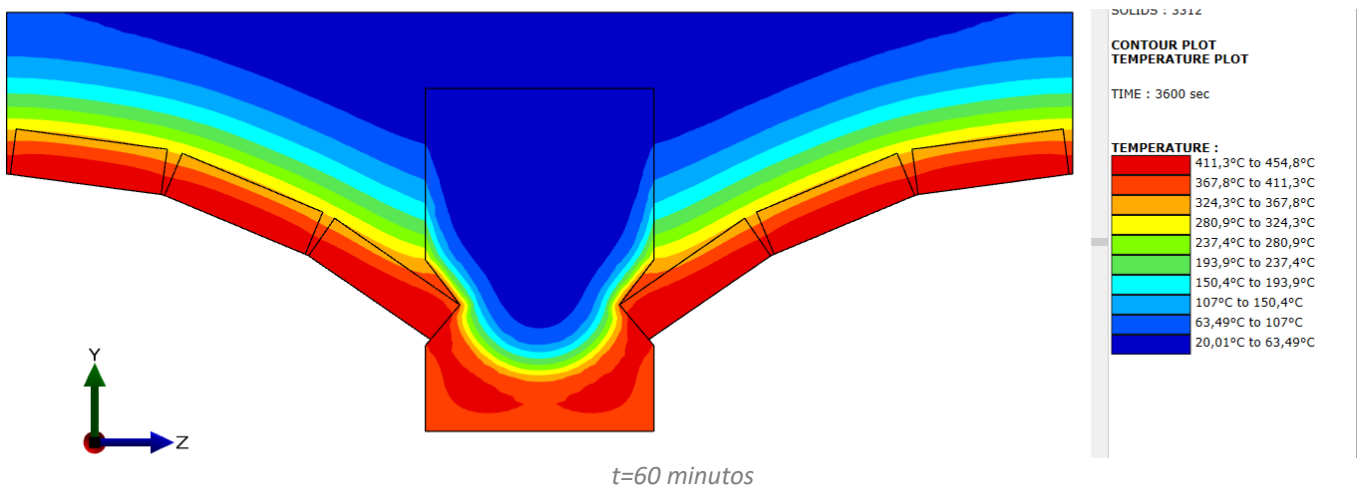
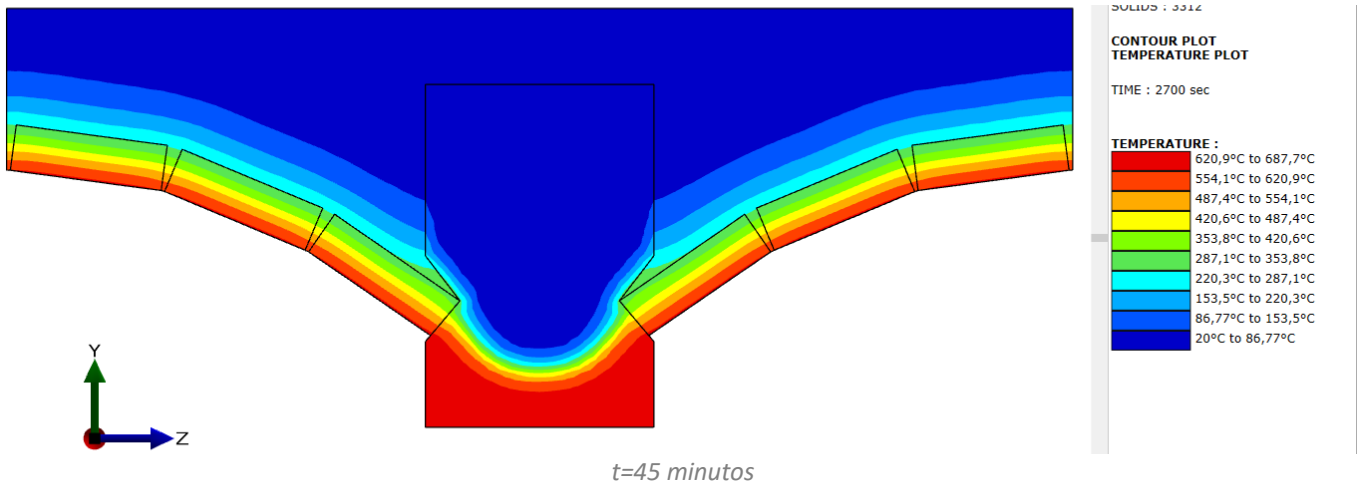


t=20 minutos

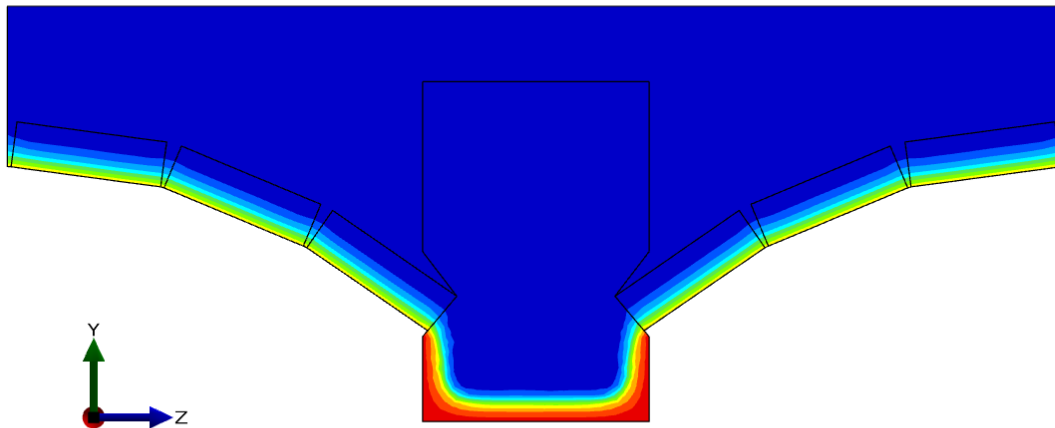


t=30 minutos





CURVA PARAMÉTRICA C1

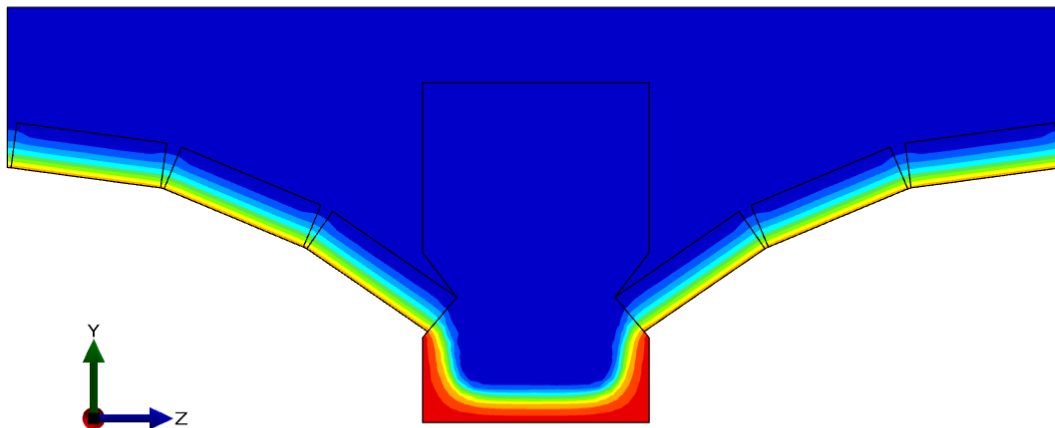
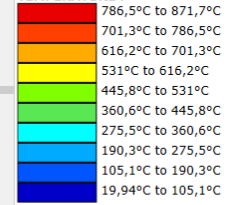


t=15 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 900 sec

TEMPERATURE :

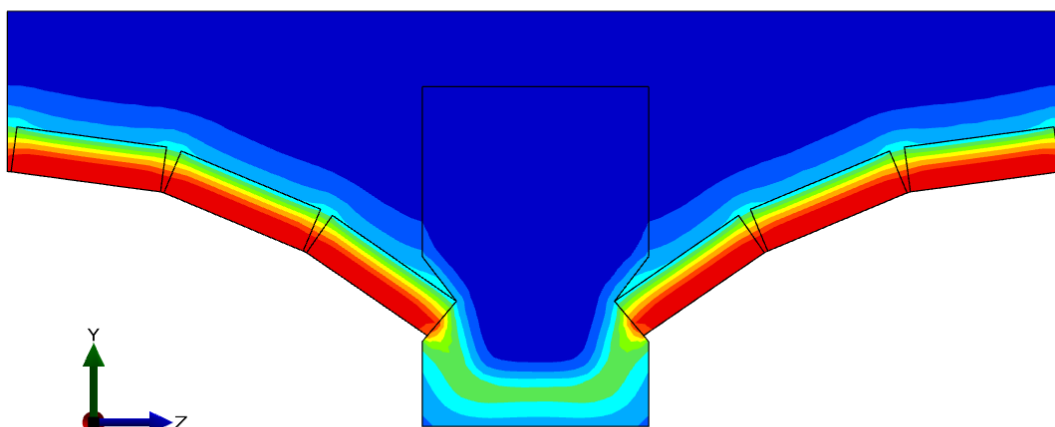
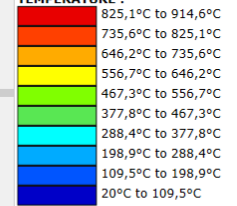


t=20 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1200 sec

TEMPERATURE :

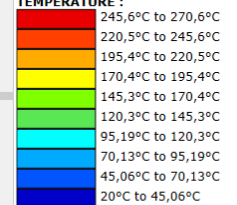


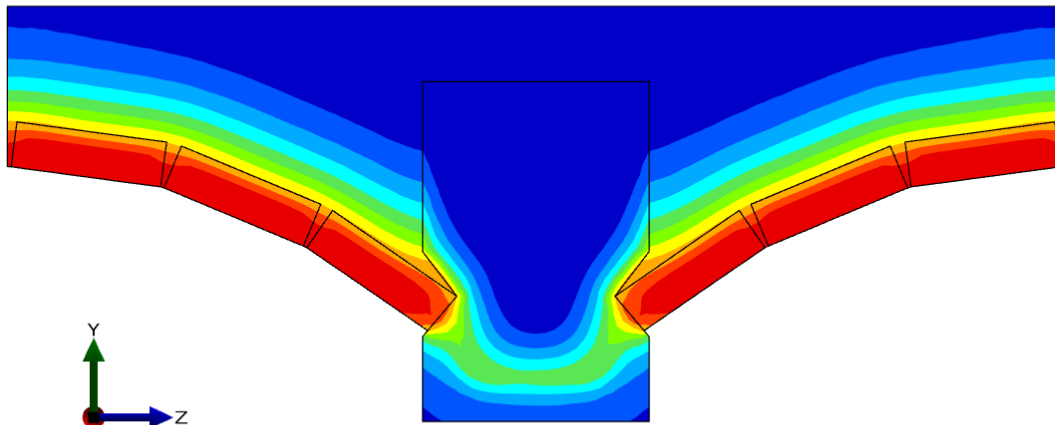
t=30 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 1800 sec

TEMPERATURE :



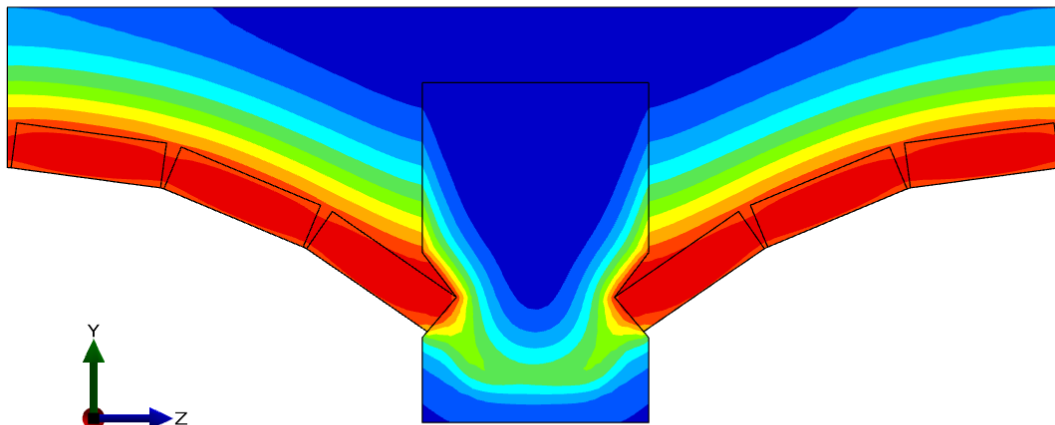
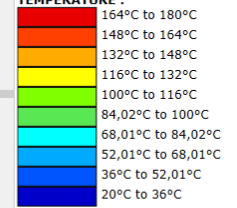


t=45 minutos

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 2700 sec

TEMPERATURE :

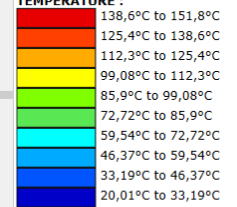


t=60 minutos

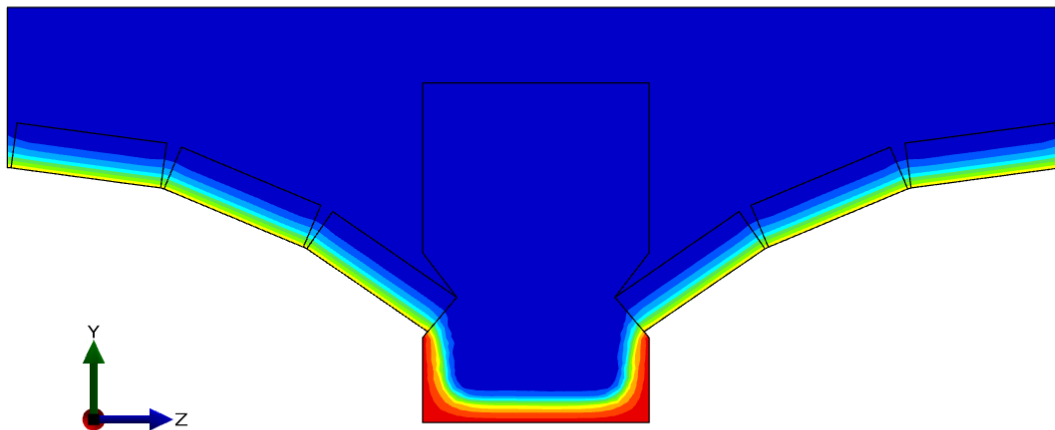
CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT

TIME : 3600 sec

TEMPERATURE :



CURVA PARAMÉTRICA C2

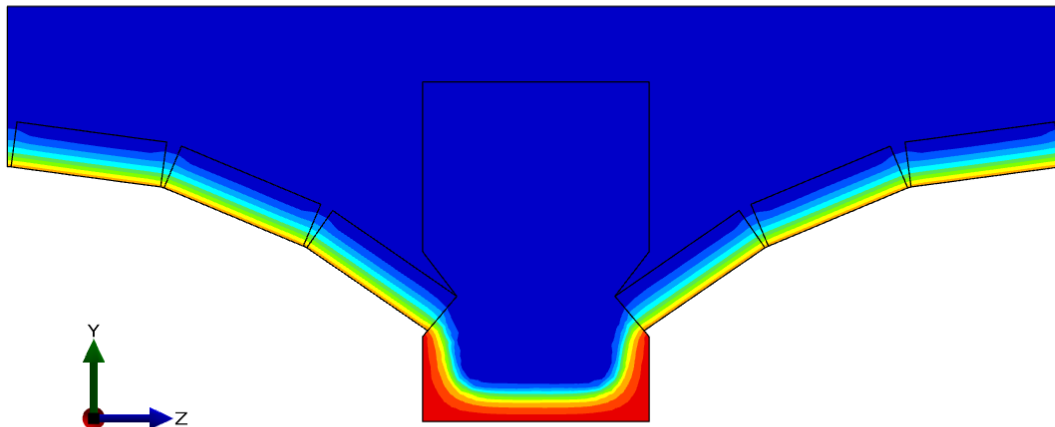
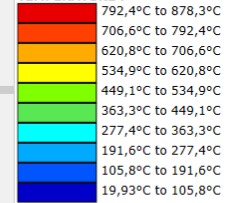


t=15 minutos

TEMPERATURE PLOT
 CONTOUR PLOT

TIME : 900 sec

TEMPERATURE :

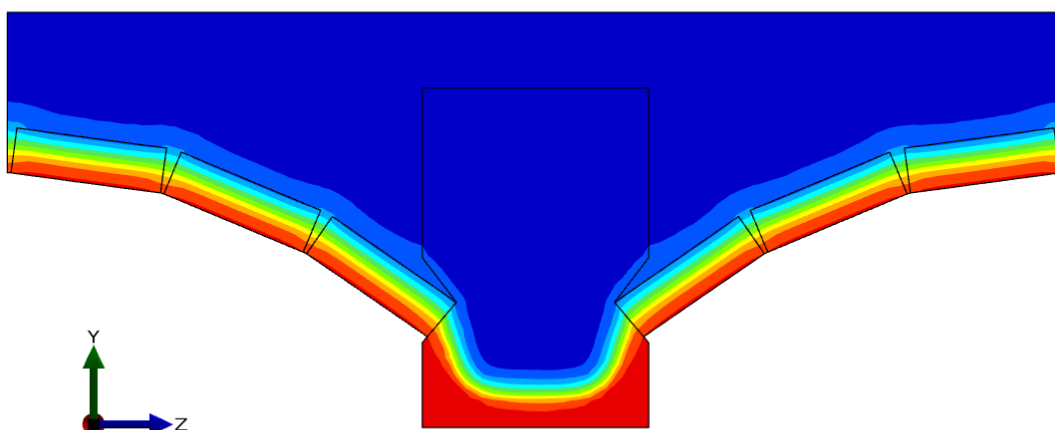
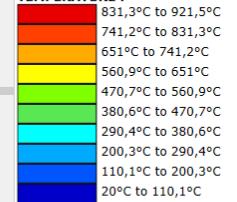


t=20 minutos

CONTOUR PLOT
 TEMPERATURE PLOT

TIME : 1200 sec

TEMPERATURE :

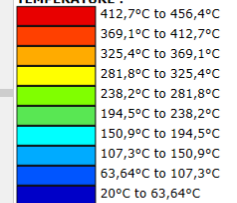


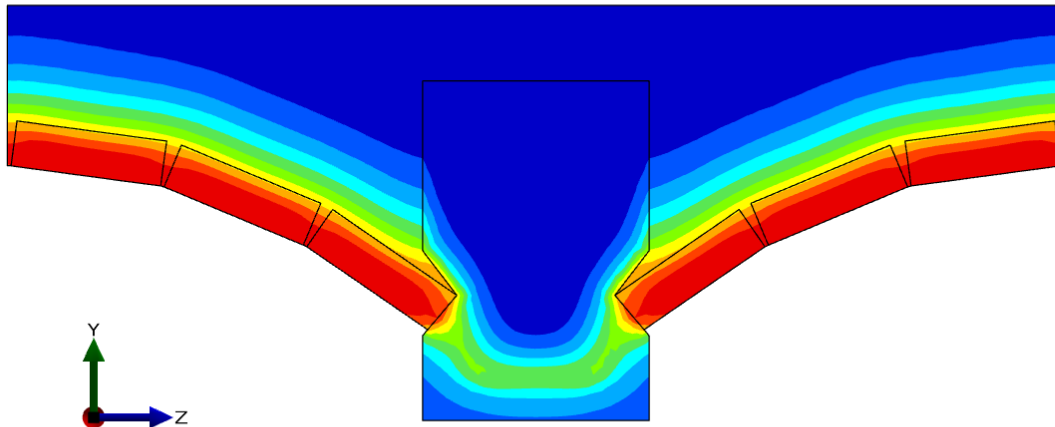
t=30 minutos

CONTOUR PLOT
 TEMPERATURE PLOT

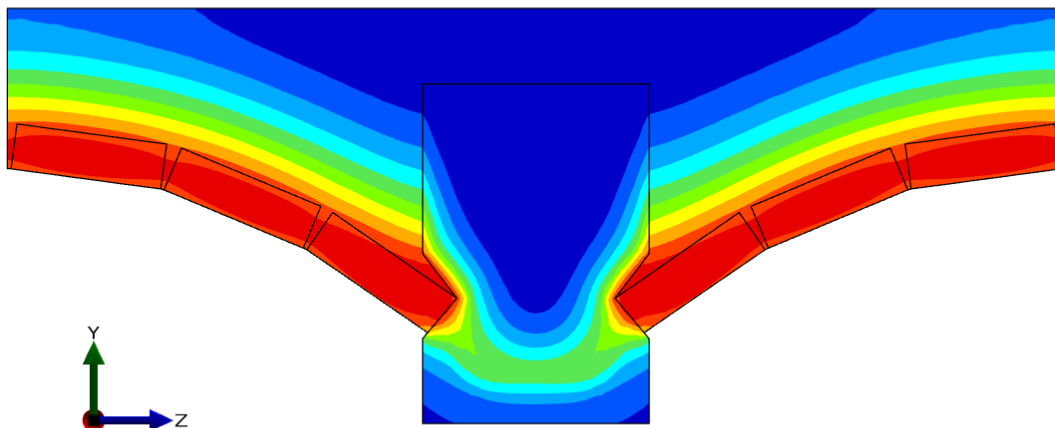
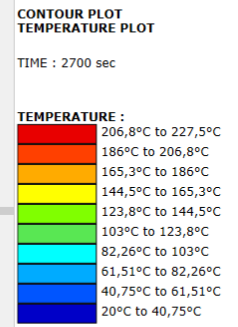
TIME : 1800 sec

TEMPERATURE :

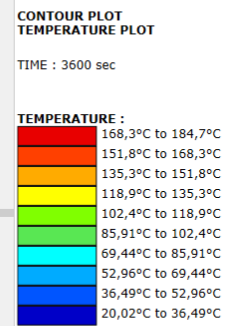




t=45 minutos



t=60 minutos



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

Anejo nº3 – Resultados de los análisis mecánicos

CÁLCULOS PREVIOS

CARGAS APLICADAS

Intereje (m) 0,70

	Densidad (kg/m ³)	Densidad (kN/m ³)	Sección transversal (m ²)	Carga lineal (kN/ml)
Vigueta	575	5,64075	0,0325	0,1833
Ladrillos	1800	17,658	0,018	0,3178
Relleno	1900	18,639	0,0694	1,2935

	Carga superficial (kN/m ²)	Carga lineal (kN/ml)	γ _{persistente}	γ _{accidental}	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂
Cargas permanentes		3,19	1,35	1			
<i>Peso propio</i>	-	1,79					
<i>Pavimento</i>	1	0,70					
<i>Tabiquería</i>	1	0,70					
Cargas variables		1,40	1,5	1			
<i>SC</i>	2	1,40			0,7	0,5	0,3
TOTAL		4,59	1,40	1,00			

q_{ELU} (kN/m) 3,61

PROPIEDADES MECÁNICAS EN SITUACIÓN DE INCENDIO

f _k (MPa)	12	E ₀₅ (MPa)	13000
k _{fi}	1,25		
f ₂₀ (MPa)	15	E ₂₀ (MPa)	16250
γ _{M,fi}	1		

CASO ISO834-A

Local	A
Modelo de fuego	ISO 834
Luz L (m)	2,47
M_{max} (kN.m)	2,76

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d_0 (mm)	7
β_n (mm/min)	0,8

t (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k_0	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
$k_0 \cdot d_0$ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	24	36	48	60	72	84	96
d_{ef} (mm)	0	17,25	23	31	43	55	67	79	91	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10055	9232	7986	6286	4908	3795	2906	2194	1673
z_{max} (cm)	11,36	11,08	11,02	10,89	10,64	10,21	9,77	9,28	8,41	7,65
W (cm ³)	1242,12	907,61	837,84	733,17	590,53	480,56	388,36	313,13	260,96	218,78
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	0,8	1,1	1,2	1,3	1,7	2,2	2,8	3,7	4,9	6,4
σ_{max} (MPa)	2,22	3,04	3,29	3,76	4,67	5,74	7,10	8,80	10,56	12,60
FS	6,76	4,94	4,56	3,99	3,21	2,61	2,11	1,70	1,42	1,19
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	13,61	12,57	11,00	8,86	7,21	5,83	4,70	3,91	3,28
$q_{máx}$ (kN/m)	24,43	17,85	16,48	14,42	11,62	9,45	7,64	6,16	5,13	4,30

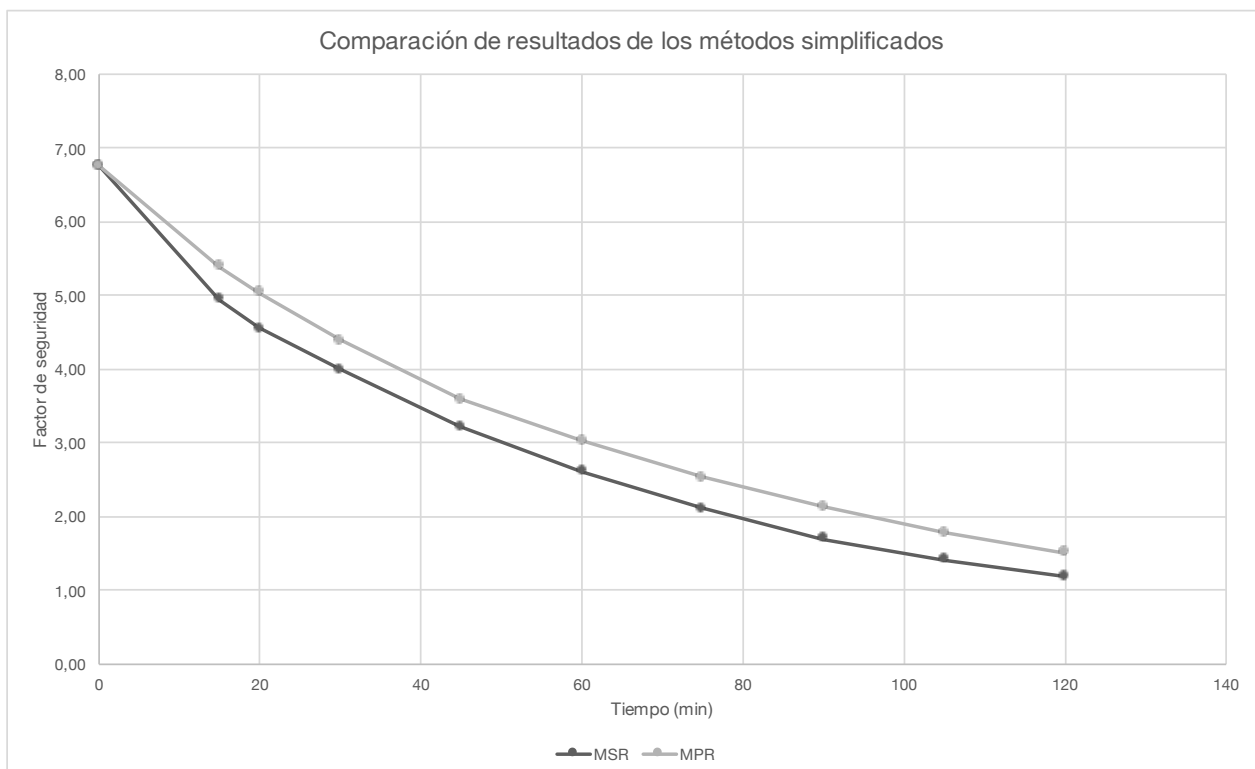
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

<i>t</i> (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	24	36	48	60	72	84	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	11108	10311	8885	7143	5786	4616	3630	2825	2155
z_{max} (cm)	11,36	11,21	11,14	11,01	10,80	10,38	9,91	9,25	8,60	7,77
W (cm ³)	1242,12	991,32	925,95	807,31	661,33	557,33	465,62	392,51	328,56	277,25
p (cm)	78,19	71,89	70,23	67,37	63,69	60,11	57,24	54,63	52,22	49,86
A_T (cm ²)	324,780	296,342	288,628	274,336	255,882	239,703	222,036	204,099	187,214	170,286
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987	0,9987	0,9987	0,9986	0,9985
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9991
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16241,01	16238,02	16237,91	16237,74	16237,65	16237,31	16236,82	16236,27	16235,58
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	0,8	1,0	1,0	1,2	1,5	1,9	2,3	3,0	3,8	5,0
σ_{max} (MPa)	2,22	2,78	2,98	3,41	4,17	4,95	5,92	7,02	8,39	9,94
FS	6,76	5,39	5,03	4,39	3,59	3,03	2,53	2,13	1,79	1,51
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	14,86	13,87	12,09	9,91	8,35	6,98	5,88	4,92	4,15
$q_{máx}$ (kN/m)	24,43	19,48	18,19	15,86	12,99	10,95	9,15	7,71	6,45	5,45

SAFIR

<i>t</i> (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	0,8	1,1	1,2	1,5	1,9	1,4	3,2	4,3	5,8	8,1
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	2,14	2,70	2,88	3,25	3,93	4,77	5,70	6,86	8,02	9,83

Tiempo de resistencia al fuego **120** min



CASO P-A1

Local A
 Modelo de fuego Paramétrico A1
 Luz L (m) 2,47

 M_{max} (kN.m) 2,76

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d_0 (mm) 7
 β_n (mm/min) 0,8

<i>t</i> (min)	0	15	20	22	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k_0	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
$k_0 \cdot d_0$ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	17,6	24	36	48	60	72	96
d_{ef} (mm)	0	17,25	23	24,6	31	43	55	67	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10075	9247	8962	8962	8962	8962	8962	8962	8962
z_{max} (cm)	11,36	11,07	11,01	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95
W (cm ³)	1242,12	909,81	839,67	818,18	818,18	818,18	818,18	818,18	818,18	818,18
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	0,8	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
σ_{max} (MPa)	2,22	3,03	3,28	3,37	3,37	3,37	3,37	3,37	3,37	3,37
FS	6,76	4,95	4,57	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	13,65	12,60	12,27	12,27	12,27	12,27	12,27	12,27	12,27
$q_{máx}$ (kN/m)	24,43	17,90	16,52	16,09	16,09	16,09	16,09	16,09	16,09	16,09

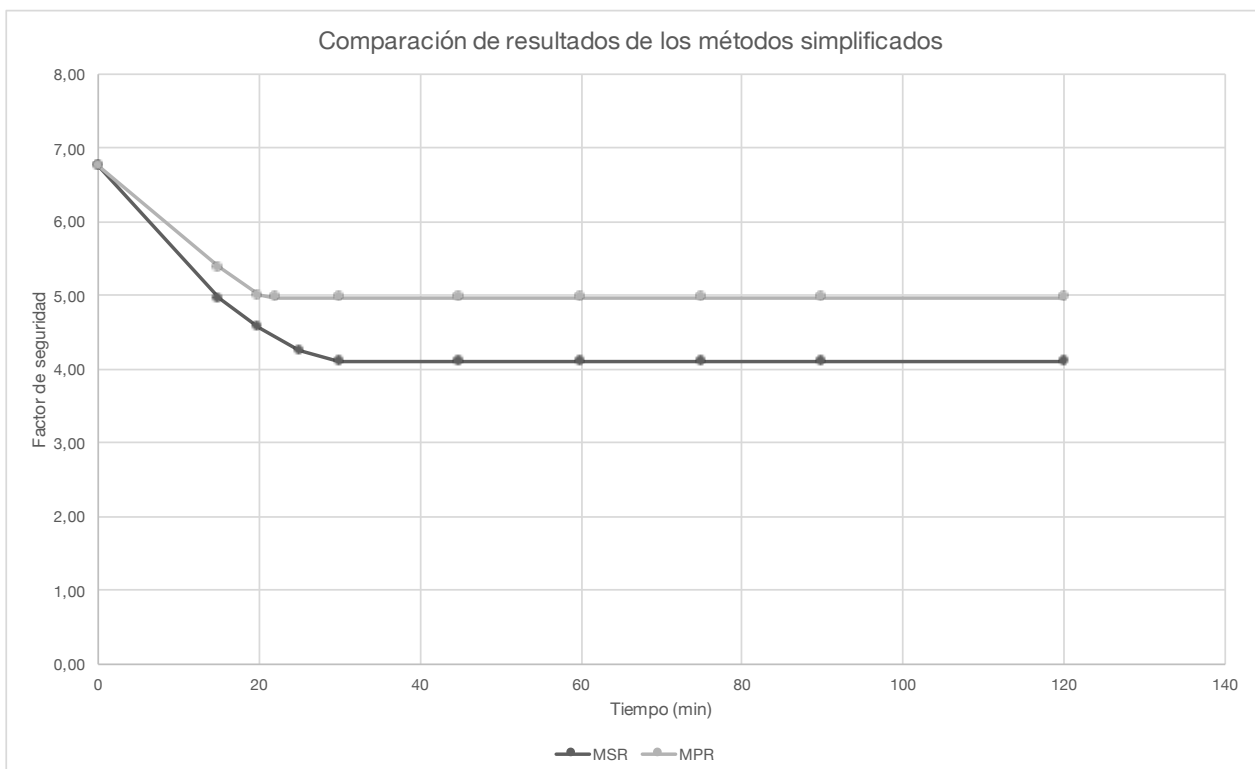
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	22	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
d _{char,n} (mm)	0	12	16	17,6	24	36	48	60	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	11109	10262	10189	10189	10189	10189	10189	10189	10189
z _{max} (cm)	11,36	11,22	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15
W (cm ³)	1242,12	989,97	920,28	913,56	913,56	913,56	913,56	913,56	913,56	913,56
p (cm)	78,19	71,80	70,13	69,85	69,85	69,85	69,85	69,85	69,85	69,85
A _T (cm ²)	324,780	296,188	288,222	287,539	287,539	287,539	287,539	287,539	287,539	287,539
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
f _{d,fi} (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
k _{mod,fi}	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16241,01	16238,02	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	0,8	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
σ _{max} (MPa)	2,22	2,78	3,00	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02	3,02
FS	6,76	5,38	5,00	4,97	4,97	4,97	4,97	4,97	4,97	4,97
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	18,63	14,84	13,79	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69	13,69
q _{máx} (kN/m)	24,43	19,45	18,08	17,95	17,95	17,95	17,95	17,95	17,95	17,95

SAFIR

t (min)	0	15	20	22	30	45	60	75	90	120
Flecha en centro-luz										
y _{max} (mm)	0,8	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ _{max} (MPa)	2,14	2,66	2,84	2,90	2,90	2,76	2,67	2,73	2,73	2,84

Tiempo de resistencia al fuego **120** min



CASO P-A2

Local A
 Modelo de fuego Paramétrico A2
 Luz L (m) 2,47
 M_{max} (kN.m) 2,76

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d₀ (mm) 7
 β_n (mm/min) 0,8

t (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k ₀	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₀ ·d ₀ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
d _{char,n} (mm)	0	12	16	20	24	36	48	60	72	96
d _{ef} (mm)	0	17,25	23	27	31	43	55	67	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10080	9223	8538	8242	8242	8242	8242	8242	8242
z _{max} (cm)	11,36	11,06	10,98	10,93	10,93	10,93	10,93	10,93	10,93	10,93
W (cm ³)	1242,12	911,11	839,69	781,43	754,34	754,34	754,34	754,34	754,34	754,34
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	0,8	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
σ _{max} (MPa)	2,22	3,03	3,28	3,53	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
FS	6,76	4,96	4,57	4,25	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	18,63	13,67	12,60	11,72	11,32	11,32	11,32	11,32	11,32	11,32
q _{máx} (kN/m)	24,43	17,92	16,52	15,37	14,84	14,84	14,84	14,84	14,84	14,84

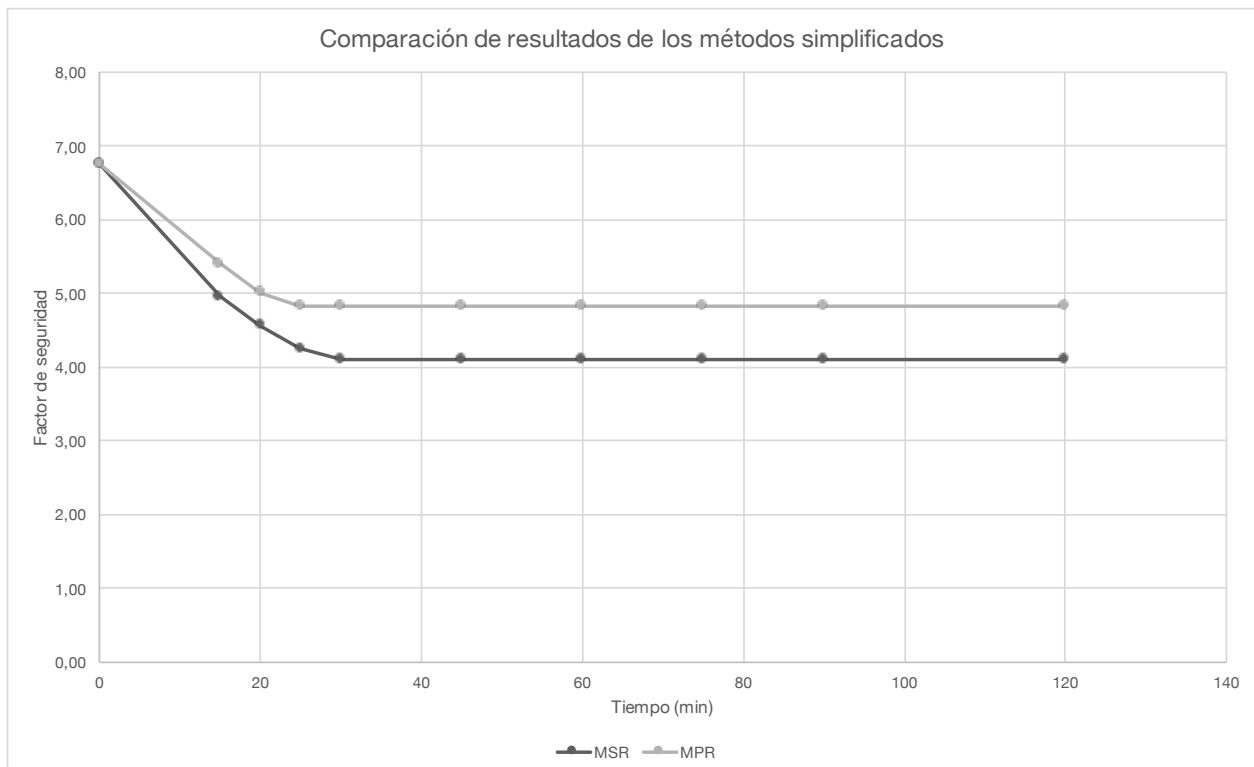
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	20	24	36	48	60	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	11149	10292	9902	9902	9902	9902	9902	9902	9902
z_{max} (cm)	11,36	11,22	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15
W (cm ³)	1242,12	993,25	922,92	888,37	888,37	888,37	888,37	888,37	888,37	888,37
p (cm)	78,19	71,88	70,24	69,11	69,11	69,11	69,11	69,11	69,11	69,11
A_T (cm ²)	324,780	296,582	288,447	284,616	284,616	284,616	284,616	284,616	284,616	284,616
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16241,01	16238,01	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04	16238,04
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	0,8	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
σ_{max} (MPa)	2,22	2,78	2,99	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
FS	6,76	5,40	5,02	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83
Máxima carga aplicable										
M_{max} (kN-m)	18,63	14,89	13,83	13,31	13,31	13,31	13,31	13,31	13,31	13,31
q_{max} (kN/m)	24,43	19,52	18,13	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45	17,45

SAFIR

t (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	0,8	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,6	1,7
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	2,14	2,66	2,85	2,98	3,01	2,91	2,75	2,68	2,74	2,83

Tiempo de resistencia al fuego 120 min



CASO ISO834-B

Local **B**
 Modelo de fuego **ISO 834**
 Luz L (m) **4,08**

 M_{max} (kN.m) **7,52**

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d_0 (mm) **7**
 β_n (mm/min) **0,8**

<i>t</i> (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k_0	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
$k_0 \cdot d_0$ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	24	36	48	60	72	84	96
d_{ef} (mm)	0	17,25	23	31	43	55	67	79	91	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10055	9232	7986	6286	5128	3795	2906	2194	1673
z_{max} (cm)	11,36	11,08	11,02	10,89	10,64	10,21	9,77	9,28	8,41	7,65
W (cm ³)	1242,12	907,61	837,84	733,17	590,53	502,10	388,36	313,13	260,96	218,78
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	5,7	8,0	8,7	10,1	12,8	15,7	21,1	27,6	36,6	48,0
σ_{max} (MPa)	6,06	8,29	8,98	10,26	12,74	14,98	19,37	24,02	28,82	34,38
FS	2,48	1,81	1,67	1,46	1,18	1,00	0,77	0,62	0,52	0,44
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	13,61	12,57	11,00	8,86	7,53	5,83	4,70	3,91	3,28
$q_{máx}$ (kN/m)	8,95	6,54	6,04	5,29	4,26	3,62	2,80	2,26	1,88	1,58

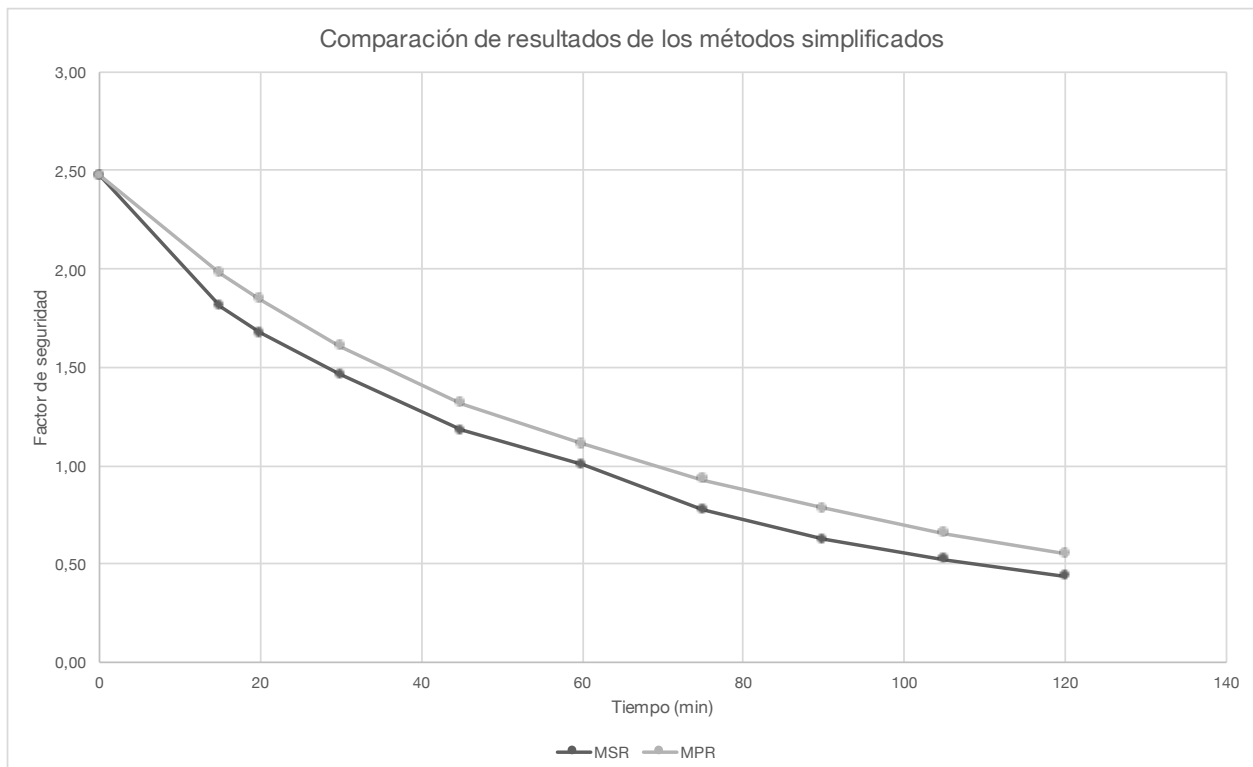
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
d _{char,n} (mm)	0	12	16	24	36	48	60	72	84	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	11108	10311	8885	7143	5786	4616	3630	2825	2155
z _{max} (cm)	11,36	11,21	11,14	11,01	10,80	10,38	9,91	9,25	8,60	7,77
W (cm ³)	1242,12	991,32	925,95	807,31	661,33	557,33	465,62	392,51	328,56	277,25
p (cm)	78,19	71,89	70,23	67,37	63,69	60,11	57,24	54,63	52,22	49,86
A _T (cm ²)	324,780	296,342	288,628	274,336	255,882	239,703	222,036	204,099	187,214	170,286
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987	0,9987	0,9987	0,9986	0,9985
f _{d,fi} (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
k _{mod,fi}	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9991
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16241,01	16238,02	16237,91	16237,74	16237,65	16237,31	16236,82	16236,27	16235,58
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	5,7	7,2	7,8	9,0	11,2	13,9	17,4	22,1	28,4	37,3
σ _{max} (MPa)	6,06	7,59	8,12	9,32	11,37	13,50	16,15	19,16	22,89	27,13
FS	2,48	1,98	1,84	1,61	1,32	1,11	0,93	0,78	0,65	0,55
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	18,63	14,86	13,87	12,09	9,91	8,35	6,98	5,88	4,92	4,15
q _{máx} (kN/m)	8,95	7,14	6,67	5,81	4,76	4,01	3,35	2,83	2,37	2,00

SAFIR

t (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Flecha en centro-luz										
y _{max} (mm)	6,0	7,7	8,5	9,3	13,0	16,8	-	-	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ _{max} (MPa)	6,12	6,83	7,28	8,22	9,92	12,05	-	-	-	-

Tiempo de resistencia al fuego 60 min



CASO P-B1

Local **B**
 Modelo de fuego **Paramétrico B1**
 Luz L (m) **4,08**

 M_{max} (kN.m) **7,52**

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d_0 (mm) **7**
 β_n (mm/min) **0,8**

<i>t</i> (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k_0	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
$k_0 \cdot d_0$ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	20	24	36	48	60	72	96
d_{ef} (mm)	0	17,25	23	27	31	43	55	67	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	9644	8716	7985	7985	7985	7985	7985	7985	7985
z_{max} (cm)	11,36	11,04	10,96	10,82	10,82	10,82	10,82	10,82	10,82	10,82
W (cm ³)	1242,12	873,20	795,07	738,20	738,20	738,20	738,20	738,20	738,20	738,20
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	5,7	8,3	9,2	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
σ_{max} (MPa)	6,06	8,61	9,46	10,19	10,19	10,19	10,19	10,19	10,19	10,19
FS	2,48	1,74	1,59	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	13,10	11,93	11,07	11,07	11,07	11,07	11,07	11,07	11,07
$q_{máx}$ (kN/m)	8,95	6,29	5,73	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32

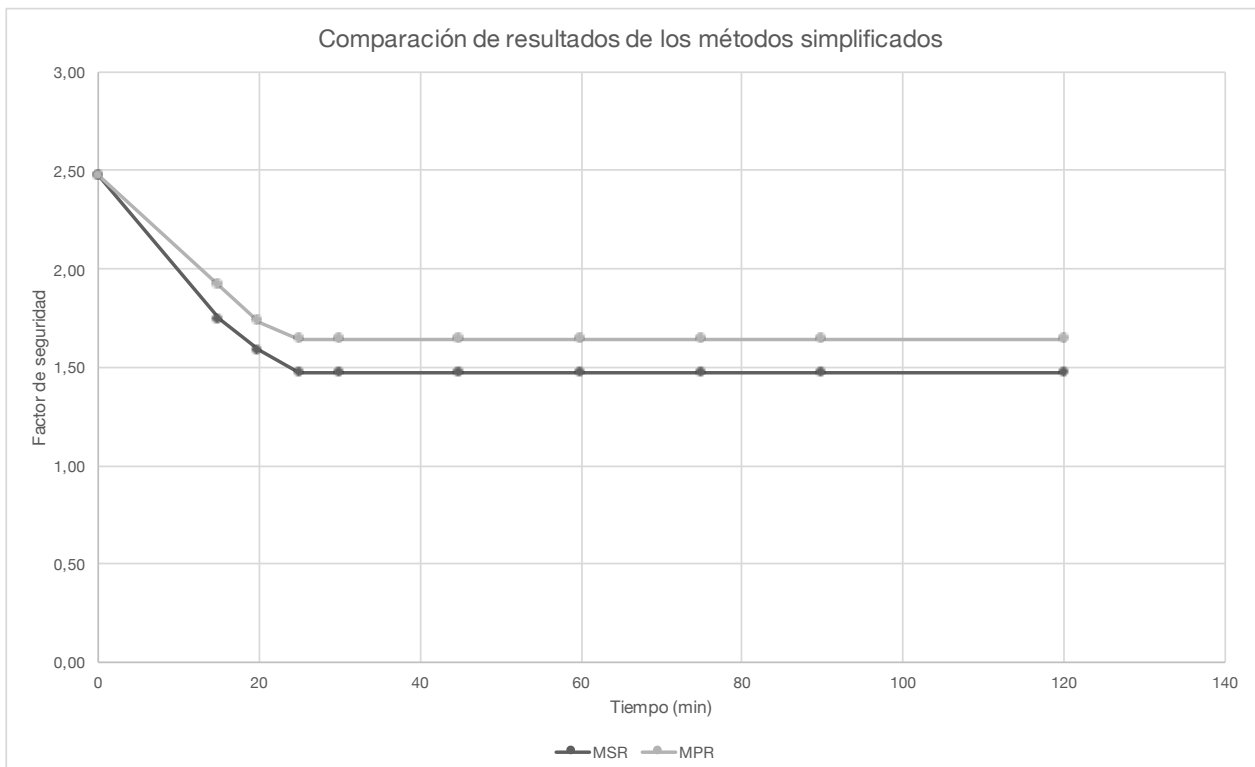
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

<i>t</i> (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	20	24	36	48	60	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10463	9656	9157	9157	9157	9157	9157	9157	9157
z_{max} (cm)	11,36	10,89	11,13	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11
W (cm ³)	1242,12	960,80	867,75	823,97	823,97	823,97	823,97	823,97	823,97	823,97
p (cm)	78,19	70,83	68,93	68,93	68,93	68,93	68,93	68,93	68,93	68,93
A_T (cm ²)	324,780	290,160	281,846	281,846	281,846	281,846	281,846	281,846	281,846	281,846
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16235,10	16230,13	16230,13	16230,13	16230,13	16230,13	16230,13	16230,13	16230,13
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	5,7	7,7	8,3	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
σ_{max} (MPa)	6,06	7,83	8,67	9,13	9,13	9,13	9,13	9,13	9,13	9,13
FS	2,48	1,91	1,73	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	14,40	13,00	12,34	12,34	12,34	12,34	12,34	12,34	12,34
$q_{máx}$ (kN/m)	8,95	6,92	6,25	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93

SAFIR

<i>t</i> (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	6,0	8,2	9,0	9,9	10,4	11,4	12,0	12,4	12,7	13,2
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	6,12	7,69	8,24	8,73	8,88	8,68	8,16	7,80	7,91	8,21

Tiempo de resistencia al fuego 120 min



CASO P-B4

Local **B**
 Modelo de fuego **Paramétrico B4**
 Luz L (m) **4,08**

 M_{max} (kN.m) **7,52**

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d_0 (mm) **7**
 β_n (mm/min) **0,8**

t (min)	0	15	20	27,3	30	45	55	60	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k_0	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
$k_0 \cdot d_0$ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	21,84	24	36	44	48	72	96
d_{ef} (mm)	0	17,25	23	28,84	31	43	51	55	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	8835	7794	6573	6197	5092	4360	4112	4112	4112
z_{max} (cm)	11,36	10,93	10,79	10,54	10,42	10,15	10,00	9,89	9,89	9,89
W (cm ³)	1242,12	808,24	722,47	623,86	594,95	501,70	436,07	415,86	415,86	415,86
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	5,7	9,1	10,3	12,2	13,0	15,8	18,4	19,5	19,5	19,5
σ_{max} (MPa)	6,06	9,31	10,41	12,06	12,64	14,99	17,25	18,09	18,09	18,09
FS	2,48	1,61	1,44	1,24	1,19	1,00	0,87	0,83	0,83	0,83
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	18,63	12,12	10,84	9,36	8,92	7,53	6,54	6,24	6,24	6,24
$q_{máx}$ (kN/m)	8,95	5,83	5,21	4,50	4,29	3,62	3,14	3,00	3,00	3,00

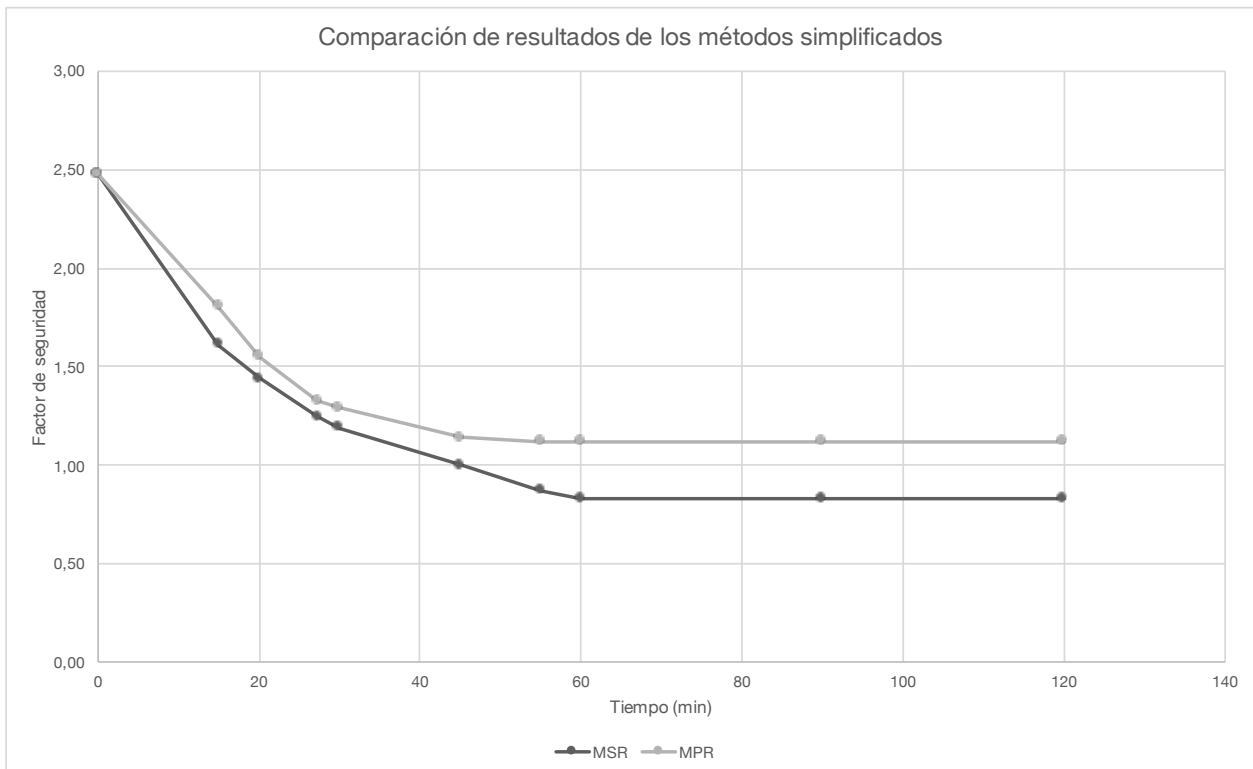
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	27,3	30	45	55	60	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	21,84	24	36	44	48	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	9589	8535	7183	6874	5932	5831	5831	5831	5831
z_{max} (cm)	11,36	10,59	10,96	10,78	10,62	10,37	10,39	10,39	10,39	10,39
W (cm ³)	1242,12	905,11	778,66	666,07	647,46	571,87	561,08	561,08	561,08	561,08
p (cm)	78,19	69,18	66,82	63,99	63,22	60,12	60,58	60,58	60,58	60,58
A_T (cm ²)	324,780	281,155	270,638	256,482	253,225	242,215	239,911	239,911	239,911	239,911
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9994	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16240,88	16237,84	16237,71	16237,71	16237,78	16237,57	16237,57	16237,57	16237,57
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	5,7	8,4	9,4	11,2	11,7	13,5	13,8	13,8	13,8	13,8
σ_{max} (MPa)	6,06	8,31	9,66	11,29	11,62	13,15	13,41	13,41	13,41	13,41
FS	2,48	1,80	1,55	1,33	1,29	1,14	1,12	1,12	1,12	1,12
Máxima carga aplicable										
M_{max} (kN·m)	18,63	13,56	11,67	9,98	9,70	8,57	8,41	8,41	8,41	8,41
q_{max} (kN/m)	8,95	6,52	5,61	4,80	4,66	4,12	4,04	4,04	4,04	4,04

SAFIR

t (min)	0	15	20	27,3	30	45	55	60	90	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	6,0	8,8	10,0	12,0	12,8	16,6	-	-	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	6,12	8,31	9,17	10,53	11,15	12,84	-	-	-	-

Tiempo de resistencia al fuego 50 min



CASO ISO834-C

Local C
 Modelo de fuego ISO 834
 Luz L (m) 4,87

 M_{max} (kN.m) 10,72

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d₀ (mm) 7
 β_n (mm/min) 0,8 Tabla 3.1 p.27

t (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k ₀	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₀ ·d ₀ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
d _{char,n} (mm)	0	12	16	24	36	48	60	72	84	96
d _{ef} (mm)	0	17,25	23	31	43	55	67	79	91	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10055	9232	7986	6286	4908	3795	2906	2194	1673
z _{max} (cm)	11,36	11,08	11,02	10,89	10,64	10,21	9,77	9,28	8,41	7,65
W (cm ³)	1242,12	907,61	837,84	733,17	590,53	480,56	388,36	313,13	260,96	218,78
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	11,5	16,2	17,6	20,4	25,9	33,2	42,9	56,1	74,3	97,4
σ _{max} (MPa)	8,63	11,81	12,79	14,62	18,15	22,30	27,59	34,22	41,07	48,98
FS	1,74	1,27	1,17	1,03	0,83	0,67	0,54	0,44	0,37	0,31
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	18,63	13,61	12,57	11,00	8,86	7,21	5,83	4,70	3,91	3,28
q _{máx} (kN/m)	6,28	4,59	4,24	3,71	2,99	2,43	1,96	1,58	1,32	1,11

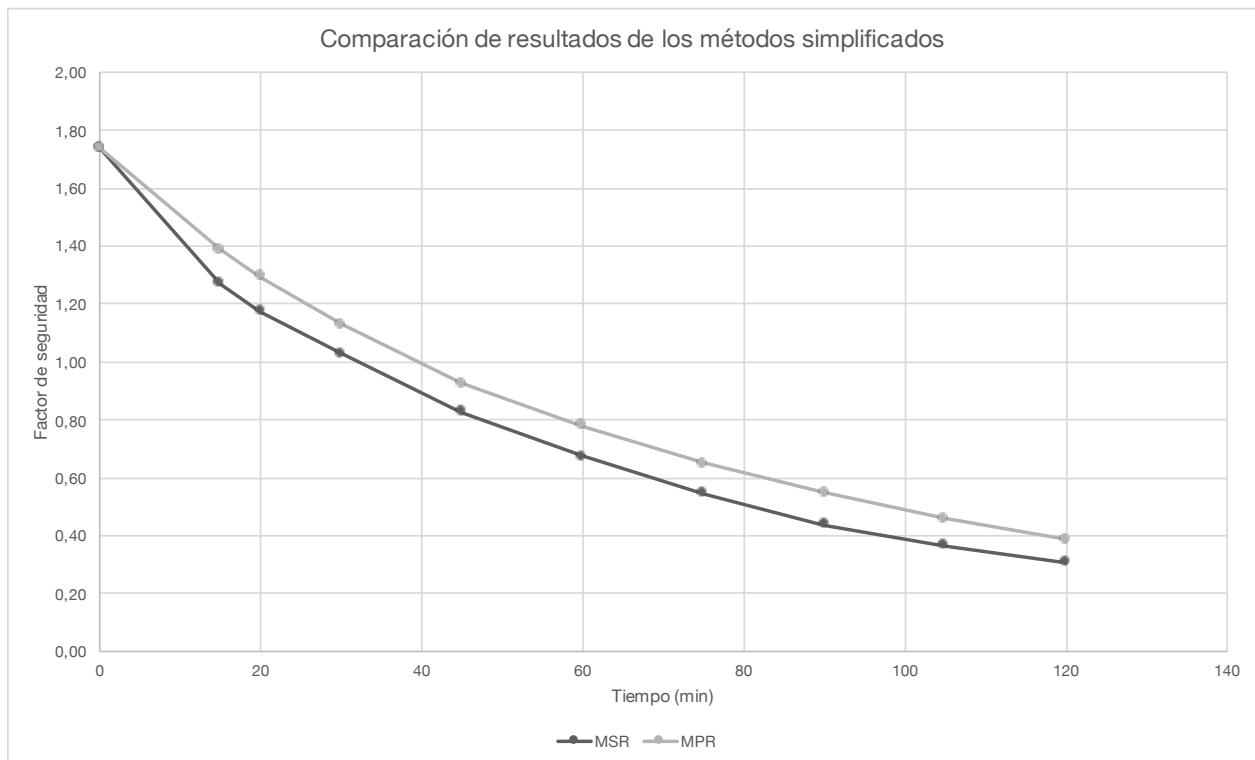
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
d _{char,n} (mm)	0	12	16	24	36	48	60	72	84	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	11108	10311	8885	7143	5786	4616	3630	2825	2155
z _{max} (cm)	11,36	11,21	11,14	11,01	10,80	10,38	9,91	9,25	8,60	7,77
W (cm ³)	1242,12	991,32	925,95	807,31	661,33	557,33	465,62	392,51	328,56	277,25
p (cm)	78,19	71,89	70,23	67,37	63,69	60,11	57,24	54,63	52,22	49,86
A _T (cm ²)	324,780	296,342	288,628	274,336	255,882	239,703	222,036	204,099	187,214	170,286
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987	0,9987	0,9987	0,9986	0,9985
f _{d,fi} (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
k _{mod,fi}	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9991
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16241,01	16238,02	16237,91	16237,74	16237,65	16237,31	16236,82	16236,27	16235,58
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	11,5	14,7	15,8	18,4	22,8	28,2	35,3	44,9	57,7	75,7
σ _{max} (MPa)	8,63	10,81	11,57	13,27	16,20	19,23	23,02	27,30	32,62	38,65
FS	1,74	1,39	1,29	1,13	0,92	0,78	0,65	0,55	0,46	0,39
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN-m)	18,63	14,86	13,87	12,09	9,91	8,35	6,98	5,88	4,92	4,15
q _{máx} (kN/m)	6,28	5,01	4,68	4,08	3,34	2,82	2,35	1,98	1,66	1,40

SAFIR

t (min)	0	15	20	30	45	60	75	90	105	120
Flecha en centro-luz										
y _{max} (mm)	12,0	17,0	18,7	22,2	-	-	-	-	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ _{max} (MPa)	8,48	11,20	12,22	12,63	-	-	-	-	-	-

Tiempo de resistencia al fuego **35** min



CASO P-C1

Local C
 Modelo de fuego Paramétrico C1
 Luz L (m) 4,87
 M_{max} (kN.m) 10,72

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d₀ (mm) 7
 β_n (mm/min) 0,8

t (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k ₀	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₀ ·d ₀ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
d _{char,n} (mm)	0	12	16	20	24	36	48	60	72	96
d _{ef} (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	9331	8432	7931	7931	7931	7931	7931	7931	7931
z _{max} (cm)	11,36	11,08	10,92	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79
W (cm ³)	1242,12	842,01	772,40	734,87	734,87	734,87	734,87	734,87	734,87	734,87
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
γ _{max} (mm)	11,5	17,5	19,3	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
σ _{max} (MPa)	8,63	12,73	13,87	14,58	14,58	14,58	14,58	14,58	14,58	14,58
FS	1,74	1,18	1,08	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	18,63	12,63	11,59	11,02	11,02	11,02	11,02	11,02	11,02	11,02
q _{máx} (kN/m)	6,28	4,26	3,91	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72

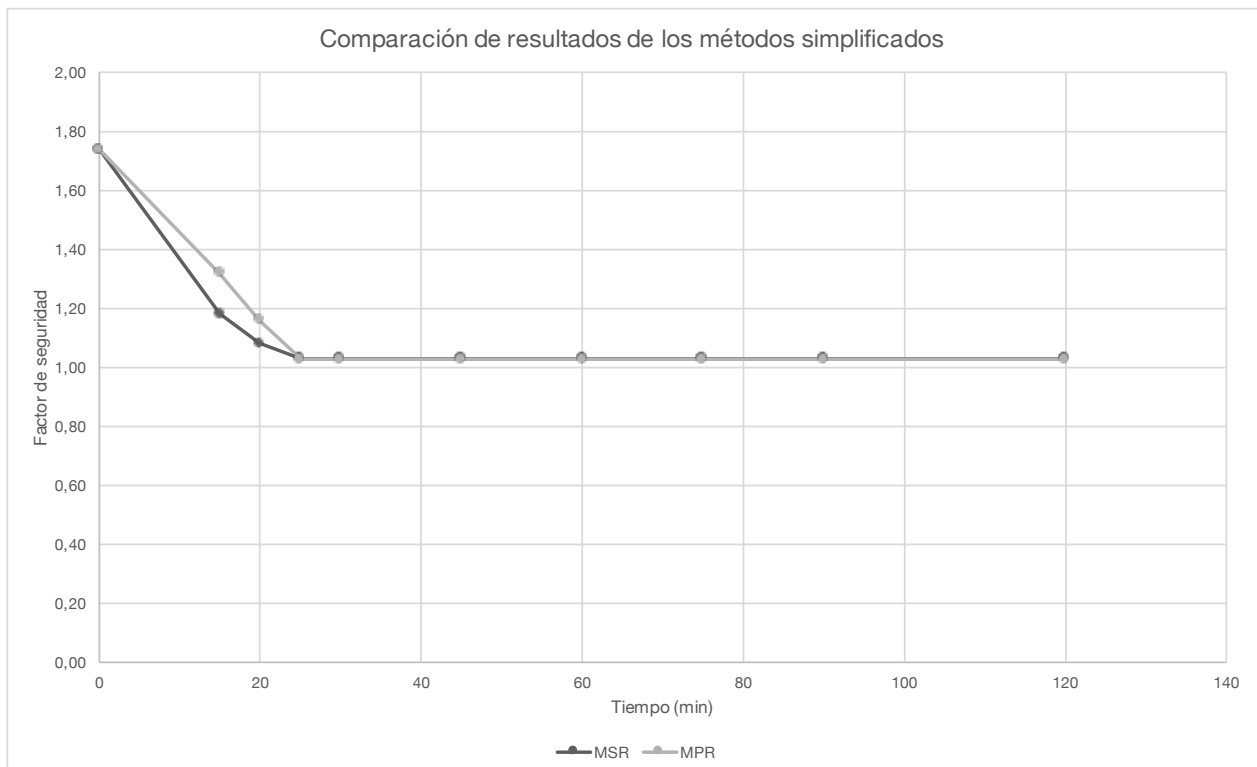
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

<i>t</i> (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	20	24	36	48	60	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10149	9144	7931	7931	7931	7931	7931	7931	7931
z_{max} (cm)	11,36	10,77	11,03	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79
W (cm ³)	1242,12	942,21	829,18	734,87	734,87	734,87	734,87	734,87	734,87	734,87
p (cm)	78,19	70,18	68,17	65,32	65,32	65,32	65,32	65,32	65,32	65,32
A_T (cm ²)	324,780	286,934	276,722	263,875	263,875	263,875	263,875	263,875	263,875	263,875
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9994	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16240,90	16237,87	16237,81	16237,81	16237,81	16237,81	16237,81	16237,81	16237,81
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	11,5	16,1	17,8	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
σ_{max} (MPa)	8,63	11,37	12,92	14,58	14,58	14,58	14,58	14,58	14,58	14,58
FS	1,74	1,32	1,16	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Máxima carga aplicable										
M_{max} (kN·m)	18,63	14,12	12,42	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01	11,01
q_{max} (kN/m)	6,28	4,76	4,19	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71

SAFIR

<i>t</i> (min)	0	15	20	25	30	45	60	75	90	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	12,0	18,3	20,6	21,7	23,1	24,5	25,3	-	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	8,48	11,20	12,22	12,65	12,63	11,96	11,56	-	-	-

Tiempo de resistencia al fuego **62** min



CASO P-C2

Local C
 Modelo de fuego Paramétrico C2
 Luz L (m) 4,87

 M_{max} (kN.m) 10,72

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d₀ (mm) 7
 β_n (mm/min) 0,8

t (min)	0	15	20	29	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k ₀	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₀ ·d ₀ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
d _{char,n} (mm)	0	12	16	23,2	24	36	48	60	72	96
d _{ef} (mm)	0	17,25	23	30,2	31	43	55	67	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	9243	8329	7224	7224	7224	7224	7224	7224	7224
z _{max} (cm)	11,36	11,03	10,89	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79	10,79
W (cm ³)	1242,12	837,86	764,80	669,61	669,61	669,61	669,61	669,61	669,61	669,61
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	11,5	17,6	19,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6
σ _{max} (MPa)	8,63	12,79	14,01	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
FS	1,74	1,17	1,07	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	18,63	12,57	11,47	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04
q _{máx} (kN/m)	6,28	4,24	3,87	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39

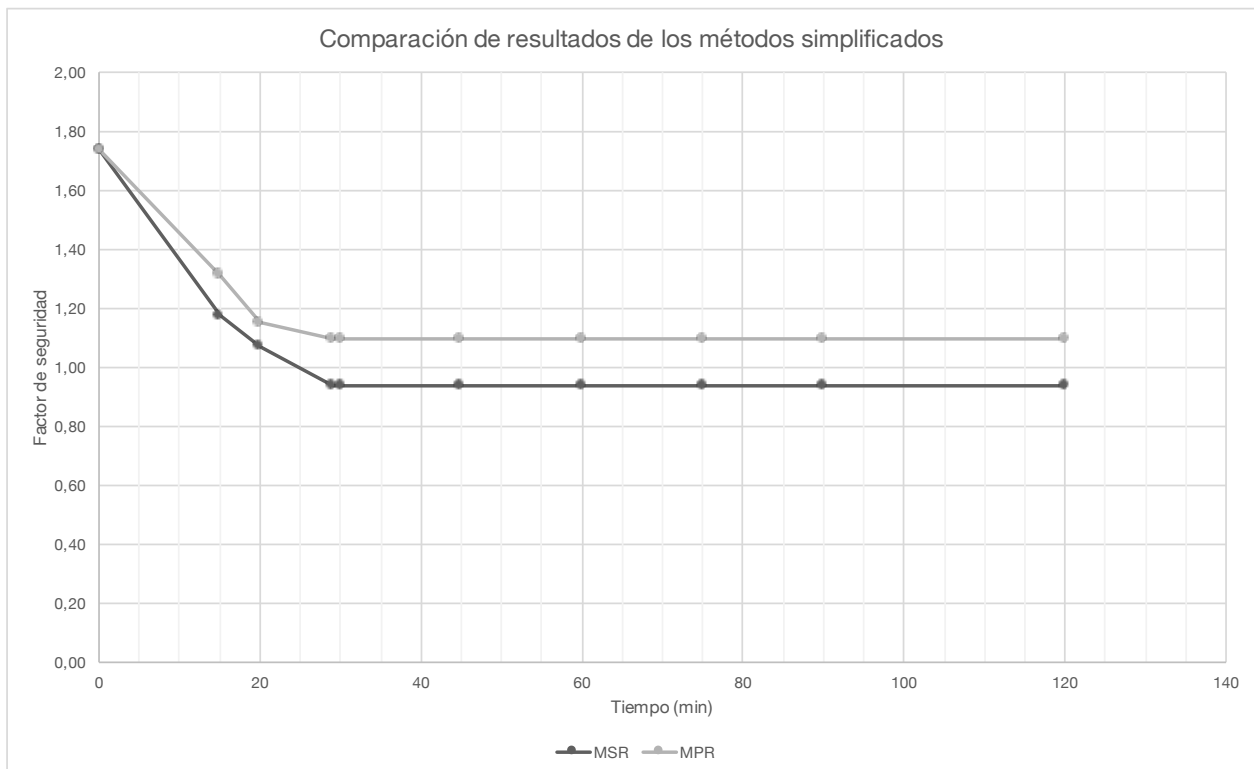
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	29	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	23,2	24	36	48	60	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	14113	10096	9057	8650	8650	8650	8650	8650	8650	8650
z_{max} (cm)	11,36	10,75	11,01	11,03	11,03	11,03	11,03	11,03	11,03	11,03
W (cm ³)	1242,12	938,77	822,63	784,14	784,14	784,14	784,14	784,14	784,14	784,14
p (cm)	78,19	70,06	68,03	66,58	66,58	66,58	66,58	66,58	66,58	66,58
A_T (cm ²)	324,780	286,406	275,994	272,039	272,039	272,039	272,039	272,039	272,039	272,039
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16240,90	16237,86	16237,95	16237,95	16237,95	16237,95	16237,95	16237,95	16237,95
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	11,5	16,1	18,0	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
σ_{max} (MPa)	8,63	11,42	13,03	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67
FS	1,74	1,31	1,15	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Máxima carga aplicable										
M_{max} (kN-m)	18,63	14,07	12,32	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75
q_{max} (kN/m)	6,28	4,75	4,16	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96

SAFIR

t (min)	0	15	20	29	30	45	60	75	90	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	12,0	18,5	20,7	23,8	24,1	-	-	-	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	8,48	11,29	12,30	13,26	13,30	-	-	-	-	-

Tiempo de resistencia al fuego 39 min



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

Anejo nº4 – Cálculos mecánicos de la solución de refuerzo

CÁLCULOS PREVIOS

CARGAS APLICADAS

Intereje (m) 0,70

	Densidad (kg/m ³)	Densidad (kN/m ³)	Sección transversal (m ²)	Carga lineal (kN/ml)
Vigueta	575	5,64075	0,0355	0,2002
Ladrillos	1800	17,658	0,018	0,3178
Relleno	1900	18,639	0,0694	1,2935

	Carga superficial (kN/m ²)	Carga lineal (kN/ml)	γ _{persistente}	γ _{accidental}	ψ ₀	ψ ₁	ψ ₂
Cargas permanentes		3,21	1,35	1			
<i>Peso propio</i>	-	1,81					
<i>Pavimento</i>	1	0,70					
<i>Tabiquería</i>	1	0,70					
Cargas variables		1,40	1,5	1			
<i>SC</i>	2	1,40			0,7	0,5	0,3
TOTAL		4,61	1,40	1,00			

q_{ELU} (kN/m) 3,63

PROPIEDADES MECÁNICAS EN SITUACIÓN DE INCENDIO

f _k (MPa)	12	E ₀₅ (MPa)	13000
k _{fi}	1,25		
f ₂₀ (MPa)	15	E ₂₀ (MPa)	16250
γ _{M,fi}	1		

CASO P-B4 REFORZADO

Local **B**
 Modelo de fuego **Paramétrico B4** Refuerzo **Listón de madera de 4 cm**
 Luz L (m) **4,08**
 M_{max} (kN.m) **7,56**

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d₀ (mm) **7**
 β_h (mm/min) **0,8**

t (min)	0	15	20	27,3	30	45	55	60	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k ₀	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₀ ·d ₀ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
d _{char,n} (mm)	0	12	16	21,84	24	36	44	48	72	96
d _{ef} (mm)	0	17,25	23	28,84	31	43	51	55	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	18320	11448	10079	8497	7922	6080	5833	5833	5833	5833
z _{max} (cm)	12,32	12,03	12,01	11,82	11,82	11,53	11,39	11,39	11,39	11,39
W (cm ³)	1487,41	951,96	839,20	718,63	670,17	527,46	512,12	512,12	512,12	512,12
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	4,4	7,0	8,0	9,5	10,2	13,3	13,8	13,8	13,8	13,8
σ _{max} (MPa)	5,08	7,94	9,00	10,52	11,28	14,33	14,76	14,76	14,76	14,76
FS	2,95	1,89	1,67	1,43	1,33	1,05	1,02	1,02	1,02	1,02
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	22,31	14,28	12,59	10,78	10,05	7,91	7,68	7,68	7,68	7,68
q _{máx} (kN/m)	10,72	6,86	6,05	5,18	4,83	3,80	3,69	3,69	3,69	3,69

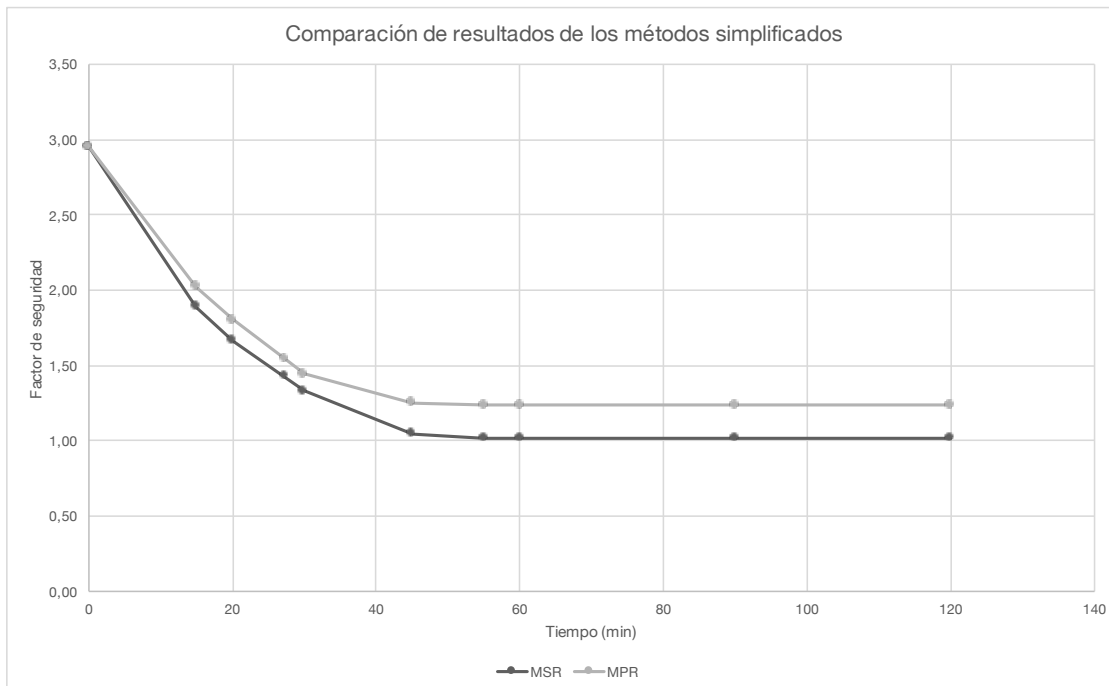
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	27,3	30	45	55	60	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
d _{char,n} (mm)	0	12	16	21,84	24	36	44	48	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
z _{inf} (m)	-0,0200	-0,0018	0,0034	0,0099	-0,4870	-0,4803	-0,4791	-0,4791	-0,4791	-0,4791
z _{sup} (m)	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	-0,2750	-0,2750	-0,2750	-0,2750	-0,2750	-0,2750
z _{cdg} (m)	0,1032	0,1197	0,1242	0,1297	-0,3680	-0,3633	-0,3626	-0,3626	-0,3626	-0,3626
I (cm ⁴)	18320	12405	10981	9337	8671	7401	7278	7278	7278	7278
z _{max} (cm)	12,32	12,15	12,07	11,98	11,90	11,70	11,65	11,65	11,65	11,65
W (cm ³)	1487,41	1021,34	909,76	779,59	728,79	632,49	624,58	624,58	624,58	624,58
p (cm)	82,19	72,85	70,30	67,36	66,25	62,95	63,19	63,19	63,19	63,19
A _T (cm ²)	354,778	302,769	289,981	274,700	268,519	255,921	252,833	252,833	252,833	252,833
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
f _{d,fi} (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
k _{mod,fi}	1,0000	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16241,05	16238,06	16237,92	16237,85	16237,89	16237,69	16237,69	16237,69	16237,69
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	4,4	6,5	7,3	8,6	9,3	10,9	11,1	11,1	11,1	11,1
σ _{max} (MPa)	5,08	7,40	8,31	9,69	10,37	11,95	12,10	12,10	12,10	12,10
FS	2,95	2,03	1,80	1,55	1,44	1,25	1,24	1,24	1,24	1,24
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	22,31	15,31	13,63	11,68	10,92	9,48	9,36	9,36	9,36	9,36
q _{máx} (kN/m)	10,72	7,36	6,55	5,61	5,25	4,55	4,50	4,50	4,50	4,50

SAFIR

t (min)	0	15	20	27,3	30	45	55	60	90	120
Flecha en centro-luz										
y _{max} (mm)	6,0	7,3	8,3	10,0	10,8	14,3	16,13	16,93	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ _{max} (MPa)	5,15	7,04	7,87	9,28	9,92	11,80	12,0	11,9	-	-

Tiempo de resistencia al fuego 64 min



CÁLCULO DE LA UNIÓN CLAVADA

DATOS

Dimensiones y tensión admisible de los clavos

d	6	mm
L	80	mm
f_u	600	MPa

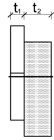
CÁLCULO SEGÚN EL CTE DB-SE-M

Momento plástico característico

$M_{y,Rk}$ 18987,41 N·mm

Dimensiones de las piezas

t1	20	mm
t2	60	mm



Resistencia al aplastamiento de las piezas

$f_{h1,k}$	44,321	N/mm ²
$f_{h2,k}$	44,321	
β	1	

Resistencia al cortante de los clavos

Form.8.6	5318,52	N
Form.8.7	15955,56	N
Form.8.8	12186,26	N
Form.8.9	2851,34	N
Form.8.10	5952,21	N
Form.8.11	3654,48	N

$F_{v,Rk}$ 2851,34 N Mínimo de las resistencias anteriores

Esfuerzo cortante de diseño en función del momento flector en la viga

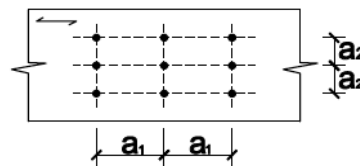
M	7556,71	N·m	
z_{max}	0,1136	m	Distancia entre la fibra neutra de la viga inicial y la superficie de deslizamiento
$F_{v,d}$	66520,34	N	

Número de clavos necesarios

Nº clavos 24

DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

a_1	30	mm
a_2	18	mm



CASO P-C2 REFORZADO

Local **C**
 Modelo de fuego **Paramétrico C2** Refuerzo **Listón de madera de 2 cm**
 Luz L (m) **4,87**
 M_{max} (kN.m) **10,77**

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d₀ (mm) **7**
 β_h (mm/min) **0,8**

t (min)	0	15	20	29	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
k ₀	0	0,75	1	1	1	1	1	1	1	1
k ₀ ·d ₀ (mm)	0	5,25	7	7	7	7	7	7	7	7
d _{char,n} (mm)	0	12	16	23,2	24	36	48	60	72	96
d _{ef} (mm)	0	17,25	23	30,2	31	43	55	67	79	103
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
I (cm ⁴)	18320	12158	10910	9559	9559	9559	9559	9559	9559	9559
z _{max} (cm)	12,32	12,05	12,03	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93
W (cm ³)	1487,41	1008,71	907,11	801,43	801,43	801,43	801,43	801,43	801,43	801,43
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
k _{mod,fi}	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
f _{d,fi} (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
E _{d,fi} (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y _{max} (mm)	8,9	13,5	15,0	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1
σ _{max} (MPa)	7,24	10,67	11,87	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
FS	2,07	1,41	1,26	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
Máxima carga aplicable										
M _{máx} (kN·m)	22,31	15,13	13,61	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02
q _{máx} (kN/m)	7,53	5,10	4,59	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06

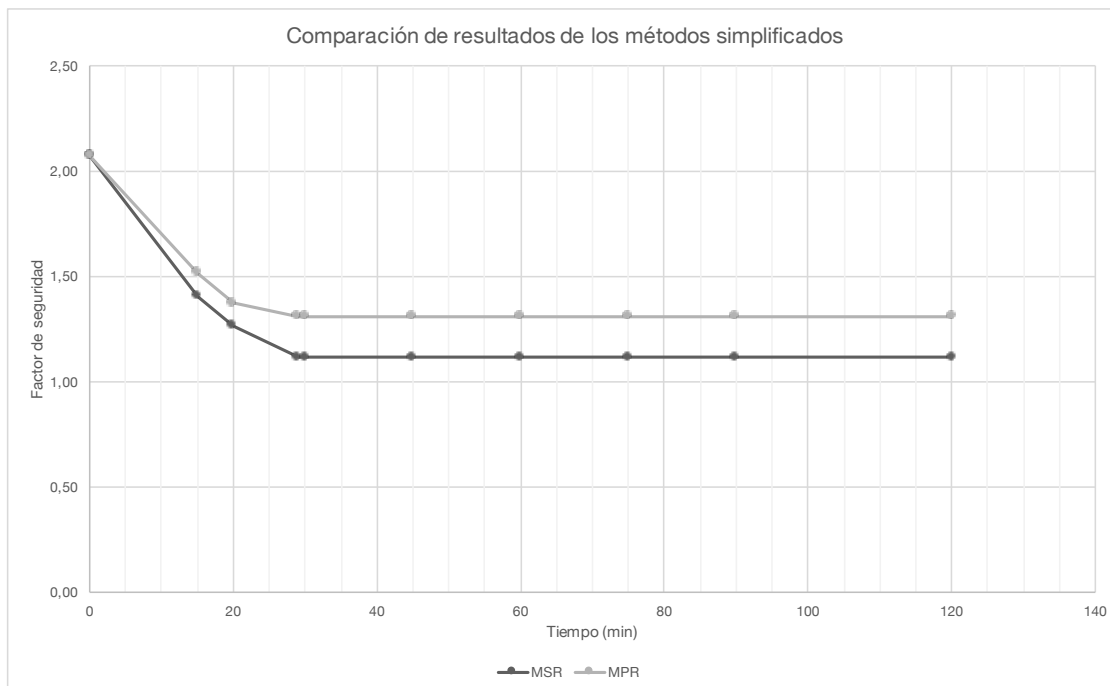
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

<i>t</i> (min)	0	15	20	29	30	45	60	75	90	120
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)										
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	23,2	24	36	48	60	72	96
Propiedades geométricas (AutoCAD)										
z_{inf} (m)	-0,0200	-0,0050	0,0000	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
z_{sup} (m)	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250	0,2250
z_{c0g} (m)	0,1032	0,1171	0,1211	0,1227	0,1227	0,1227	0,1227	0,1227	0,1227	0,1227
I (cm ⁴)	18320	13284	11933	11386	11386	11386	11386	11386	11386	11386
z_{max} (cm)	12,32	12,21	12,11	12,11	12,11	12,11	12,11	12,11	12,11	12,11
W (cm ³)	1487,41	1088,16	985,02	940,05	940,05	940,05	940,05	940,05	940,05	940,05
p (cm)	82,19	73,99	71,99	70,50	70,50	70,50	70,50	70,50	70,50	70,50
A_T (cm ²)	354,778	310,407	298,512	294,381	294,381	294,381	294,381	294,381	294,381	294,381
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)										
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9995	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16241,09	16238,12	16238,21	16238,21	16238,21	16238,21	16238,21	16238,21	16238,21
Tensión y flecha en la sección de centro-luz										
y_{max} (mm)	8,9	12,3	13,7	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
σ_{max} (MPa)	7,24	9,89	10,93	11,45	11,45	11,45	11,45	11,45	11,45	11,45
FS	2,07	1,51	1,37	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Máxima carga aplicable										
$M_{máx}$ (kN·m)	22,31	16,31	14,76	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08	14,08
$q_{máx}$ (kN/m)	7,53	5,50	4,98	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75

SAFIR

<i>t</i> (min)	0	15	20	29	30	45	60	75	90	120
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	9,3	14,1	15,8	18,4	18,5	20,3	21,3	22,0	22,6	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	7,16	9,51	10,40	11,60	11,60	11,40	10,60	10,20	10,20	-

Tiempo de resistencia al fuego **93** min



CASO ISO834-C REFORZADO

Local C
 Modelo de fuego ISO 834 Refuerzo Listón de madera de 4 cm
 Luz L (m) 4,87

 M_{max} (kN.m) 10,78

MÉTODO DE LA SECCIÓN REDUCIDA

d_0 (mm) 7
 β_h (mm/min) 0,8

<i>t</i> (min)	0	15	20	30	45	60
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)						
k_0	0	0,75	1	1	1	1
$k_0 \cdot d_0$ (mm)	0	5,25	7	7	7	7
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	24	36	48
d_{ef} (mm)	0	17,25	23	31	43	55
Propiedades geométricas (AutoCAD)						
I (cm ⁴)	23236	17187	15455	13277	11243	9362
z_{max} (cm)	13,28	13,32	13,18	13,19	13,17	13,01
W (cm ³)	1749,91	1290,48	1172,93	1006,72	853,41	719,36
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)						
$k_{mod,fi}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00	16250,00
Tensión y flecha en la sección de centro-luz						
y_{max} (mm)	7,0	9,5	10,6	12,3	14,6	17,5
σ_{max} (MPa)	6,16	8,35	9,19	10,70	12,63	14,98
FS	2,44	1,80	1,63	1,40	1,19	1,00
Máxima carga aplicable						
$M_{máx}$ (kN·m)	26,25	19,36	17,59	15,10	12,80	10,79
$q_{máx}$ (kN/m)	8,85	6,53	5,93	5,09	4,32	3,64

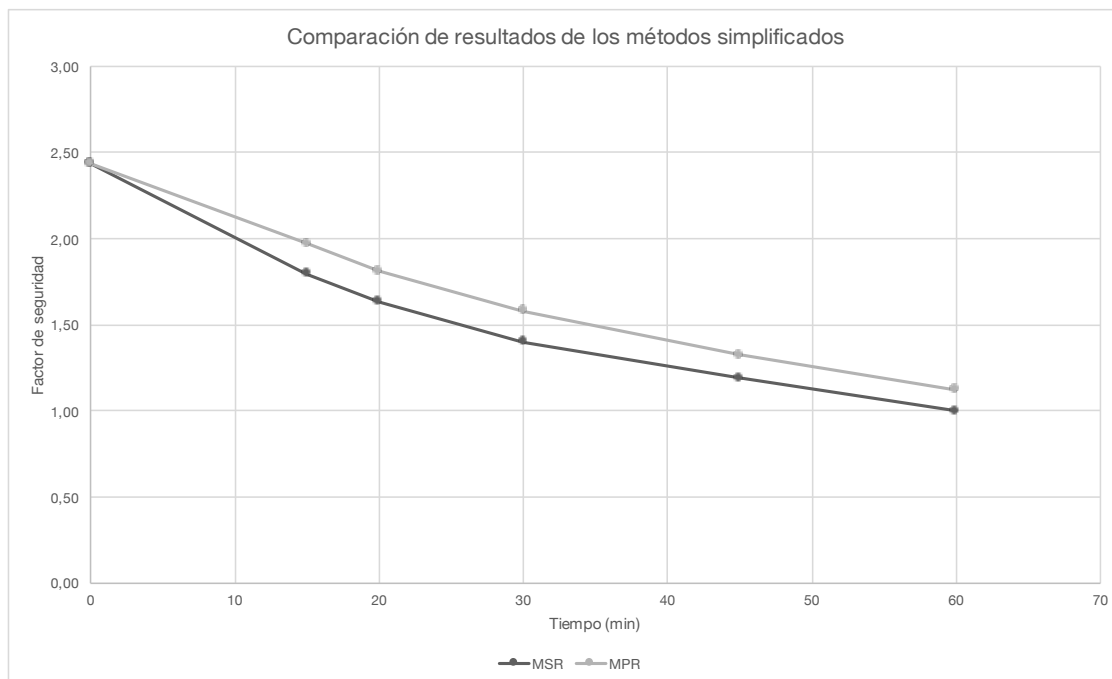
MÉTODO DE LAS PROPIEDADES REDUCIDAS

t (min)	0	15	20	30	45	60
Profundidades de carbonización (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 3.4)						
$d_{char,n}$ (mm)	0	12	16	24	36	48
Propiedades geométricas (AutoCAD)						
I (cm ⁴)	23236	18917	17548	15056	12632	10568
z_{max} (cm)	13,28	13,35	13,50	13,24	13,24	13,10
W (cm ³)	1749,91	1416,85	1300,20	1137,18	954,15	806,75
p (cm)	86,19	79,97	78,19	75,23	71,05	66,97
A_T (cm ²)	384,778	349,535	338,171	318,865	294,355	270,950
Propiedades mecánicas (UNE-EN 1995-1-2:2016 Apartado 2.3)						
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9991	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988
$f_{d,fi}$ (MPa)	15,00	14,99	14,98	14,98	14,98	14,98
$k_{mod,fi}$	1,0000	0,9995	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
$E_{d,fi}$ (MPa)	16250,00	16241,46	16238,61	16238,38	16238,11	16237,83
Tensión y flecha en la sección de centro-luz						
y_{max} (mm)	7,0	8,7	9,3	10,9	13,0	15,5
σ_{max} (MPa)	6,16	7,61	8,29	9,48	11,29	13,36
FS	2,44	1,97	1,81	1,58	1,33	1,12
Máxima carga aplicable						
$M_{máx}$ (kN·m)	26,25	21,23	19,48	17,04	14,30	12,09
$q_{máx}$ (kN/m)	8,85	7,16	6,57	5,75	4,82	4,08

SAFIR

t (min)	0	15	20	30	45	60	0	0	0	0
Flecha en centro-luz										
y_{max} (mm)	7,3	10,0	11,0	13,2	17,0	21,1	-	-	-	-
Tensión máxima en la sección de centro-luz										
σ_{max} (MPa)	5,99	7,89	8,95	10,10	11,90	13,30	-	-	-	-

Tiempo de resistencia al fuego 60 min



CÁLCULO DE LA UNIÓN CLAVADA

DATOS

Dimensiones y tensión admisible de los clavos

d	6	mm
L	100	mm
fu	600	MPa

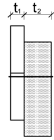
CÁLCULO SEGÚN EL CTE DB-SE-M

Momento plástico característico

My,Rk 18987,41 N·mm

Dimensiones de las piezas

t1	40	mm
t2	60	mm



Resistencia al aplastamiento de las piezas

$f_{h1,k}$	44,321	N/mm ²
$f_{h2,k}$	44,321	
β	1	

Resistencia al cortante de los clavos

Form.8.6	10637,04	N
Form.8.7	15955,56	N
Form.8.8	14565,37	N
Form.8.9	4264,03	N
Form.8.10	5952,21	N
Form.8.11	3654,48	N

Fv,Rk 3654,48 N Mínimo de las resistencias anteriores

Esfuerzo cortante de diseño en función del momento flector en la viga

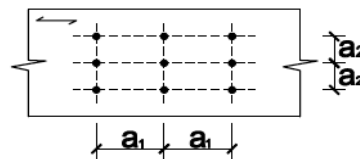
M	10775,29	N·m	
z_{max}	0,1136	m	Distancia entre la fibra neutra de la viga inicial y la superficie de deslizamiento
Fv,d	94852,91	N	

Número de clavos necesarios

Nº clavos 26

DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

a ₁	30	mm
a ₂	18	mm



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

Anejo nº5 – Relación del TFM con los Objetivos del Desarrollo Sostenible

Relación del TFG/TFM “Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.			X	
ODS 4. Educación de calidad.			X	
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.		X		
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables.	X			
ODS 13. Acción por el clima.		X		
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.			X	

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

Ante el crecimiento poblacional que se prevé para los próximos años, se ha de adaptar las ciudades para el futuro. En efecto, varios estudios del proceso de urbanización indican que al horizonte 2050, el 68% de las personas vivirá en ciudades. Para ello, la solución más sencilla radica en construir edificios nuevos en espacios libres de construcciones, ampliando el tamaño de las ciudades. No obstante, esta solución engendra la necesidad de adaptar las infraestructuras auxiliares, como pueden ser las infraestructuras

viarias, lo que puede provocar problemas de impermeabilización del suelo. Además, el sector de la construcción es uno de los más contaminantes. Por lo tanto, conviene reducir la proporción de edificios nuevos y proceder a la restauración de edificios antiguos.

En cuanto a la restauración de edificios existentes, la mayoría de las intervenciones consisten en modificar totalmente la estructura portante, empleando hormigón y acero ya que son materiales sencillos de diseñar, y conservar las fachadas. Este modo de funcionamiento requiere cantidades de materiales más elevadas que el refuerzo o la sustitución funcional de los elementos dañados únicamente.

El objeto del presente TFM era de analizar la resistencia al fuego de una tipología de forjado típica de Valencia, con el objetivo de adaptar esta estructura a las normativas vigentes. Se ha podido ver que los elementos no necesitaban una sustitución total sino un refuerzo de las viguetas. Generalizando esta forma de proceder en el ámbito de la rehabilitación, se podría a largo plazo, cumplir con el **ODS 12 - Producción y consumo responsables** ya que se observaría una reducción del consumo de los materiales destinados a la construcción.

Además, la solución de refuerzo escogida no necesita medios de elevación mecánica, reduciendo así el impacto ambiental de la obra. Por otra parte, el empleo de la madera en la restauración tiene una ventaja propia a este material, puesto que durante toda su vida útil emite 1 tonelada de dióxido de carbono por cada 0,7 toneladas de dióxido de carbono emitido. Extrapolando este comportamiento a la escala de un barrio o de una ciudad entera, se haría un paso más hacia el cumplimiento del **ODS 11 – Ciudades y comunidades sostenibles**.

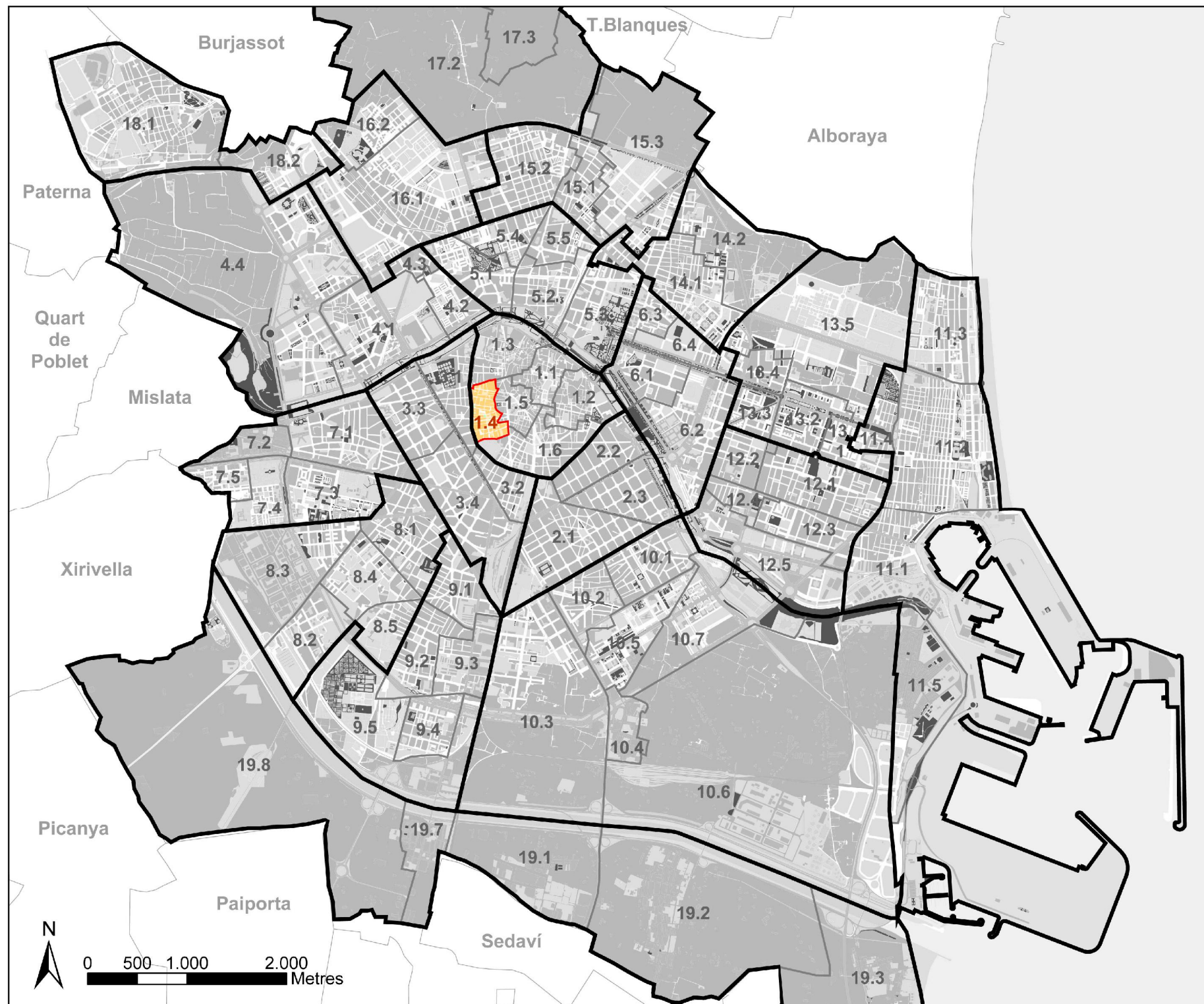
Finalmente, el trabajo de la madera para la rehabilitación requiere de una mano de obra particularmente especializada, del uso de materiales propios a la zona de intervención, lo que impulsa la economía local y el trabajo de carpinteros y artesanos locales. Es por este motivo que se considera que el TFM tiene un grado de relación alto con el **ODS 8 – Trabajo decente y crecimiento económico**.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de la resistencia a incendio de forjados de edificios históricos sometidos a incendios naturales. Aplicación a un edificio histórico en la ciudad de Valencia.

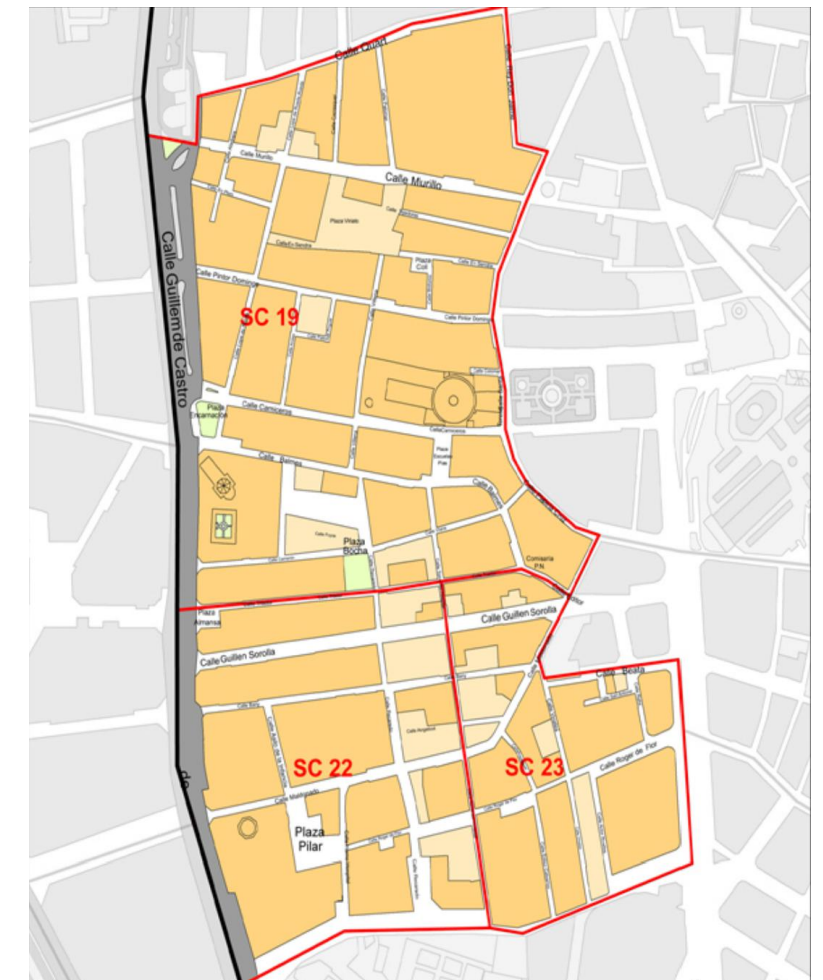
Planos

Ciudad : Valencia



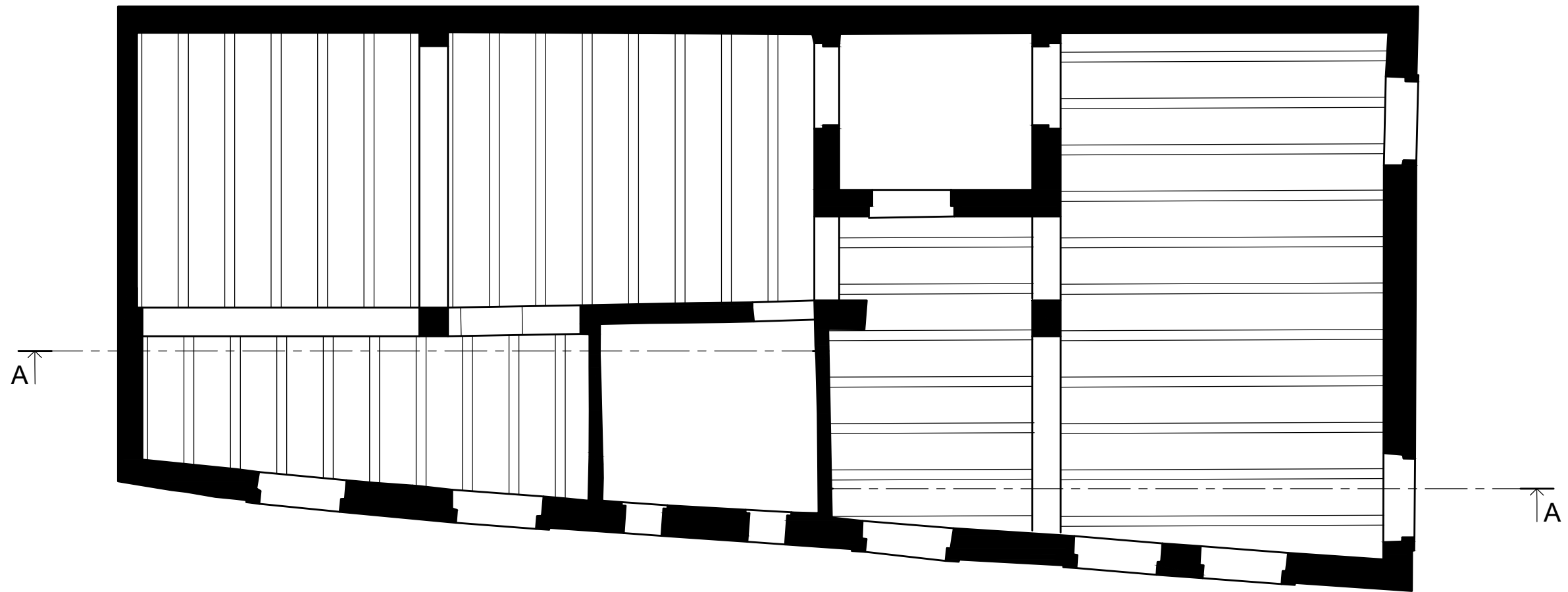
Escala : 1:50.000

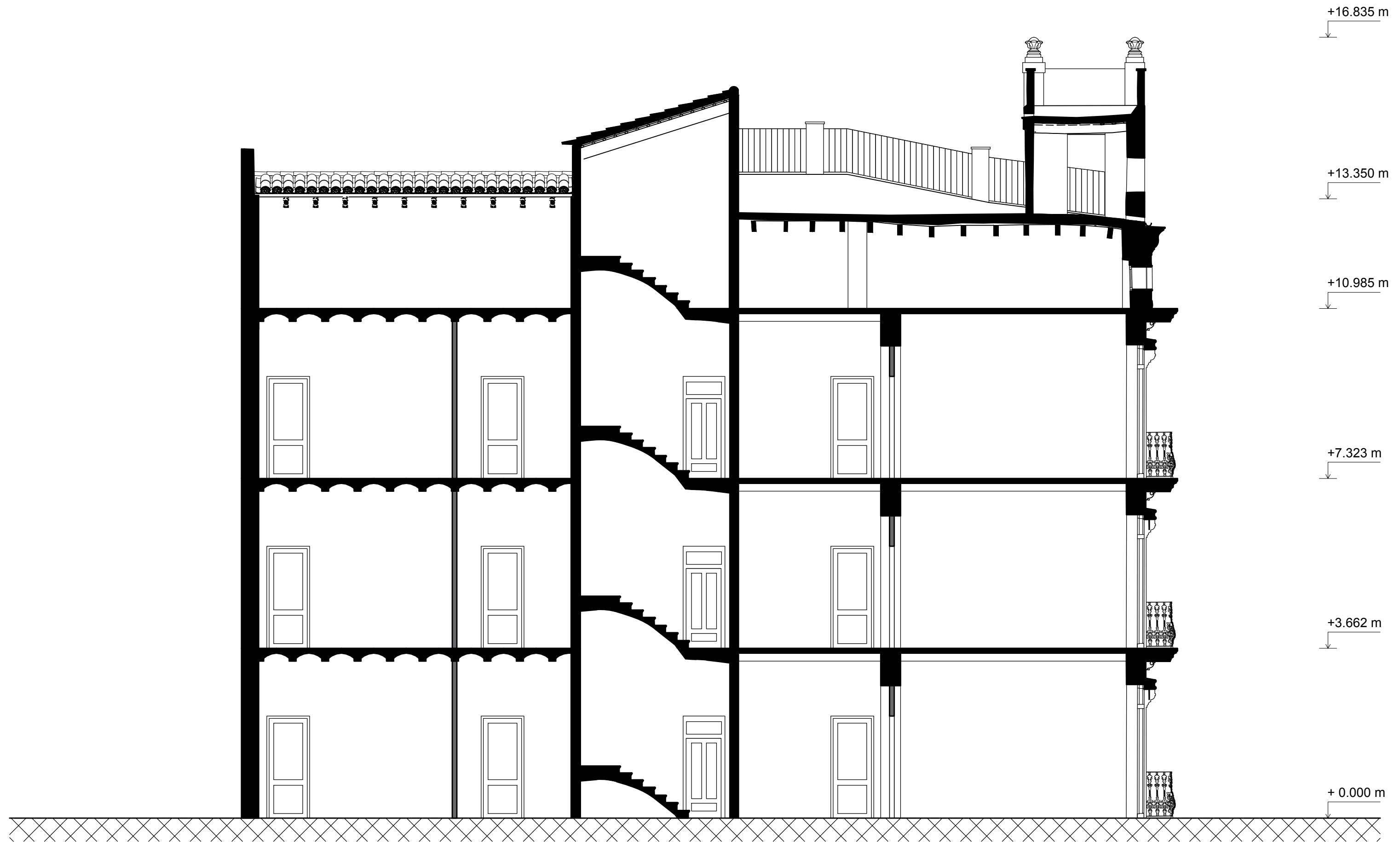
Barrio : El Pilar



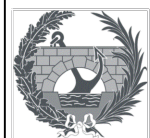
Escala : 1:5.000








TÍTULO :
ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A INCENDIO DE FORJADOS DE EDIFICIOS HISTÓRICOS SOMETIDOS A FUEGOS NATURALES. APLICACIÓN A UN EDIFICIO HISTÓRICO EN LA CIUDAD DE VALÈNCIA



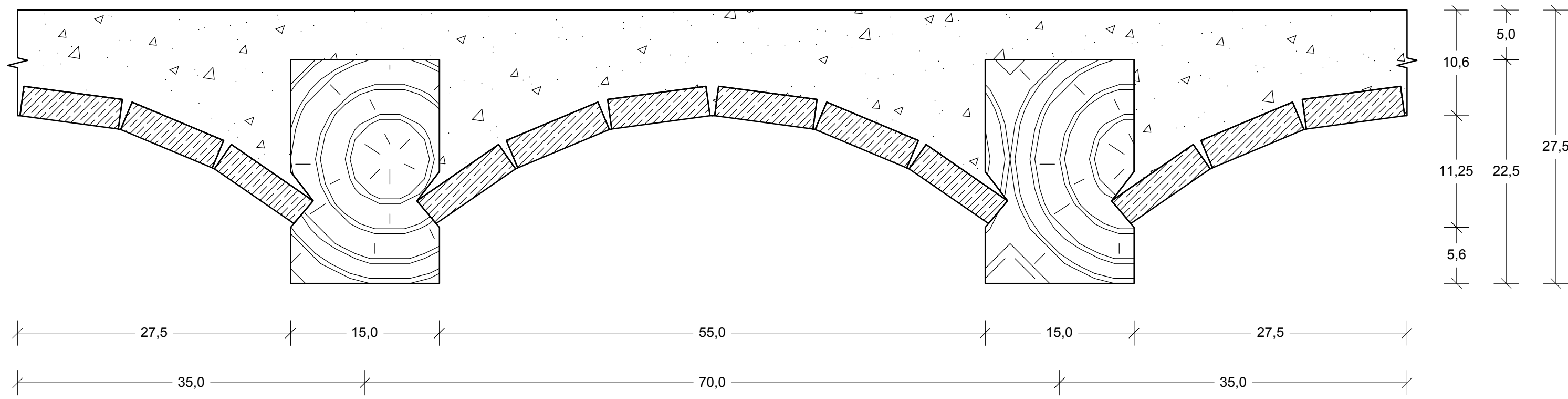
AUTOR :

 Cailleaux, Tanguy




TÍTULO DEL PLANO :
 ESCALA : 1:75

Alzado del edificio
 Corte A-A

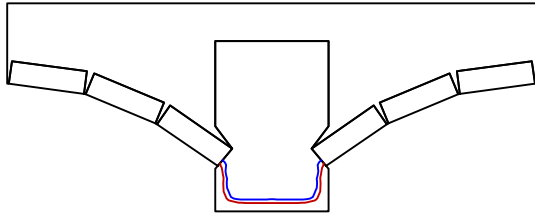
FECHA : 03/09/2021

PLANO N° :
3

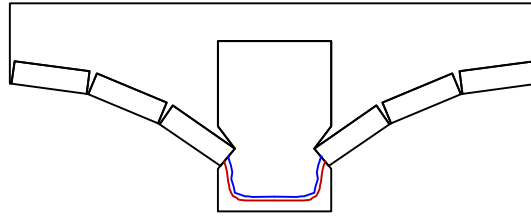


-  Madera *Pino laricio*
-  Ladrillos
-  Mortero de cal

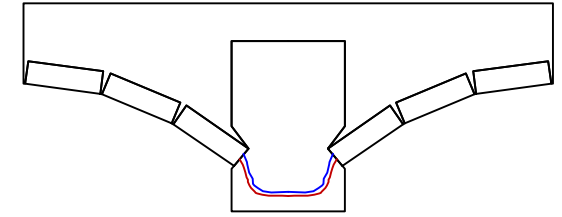
t=15 min



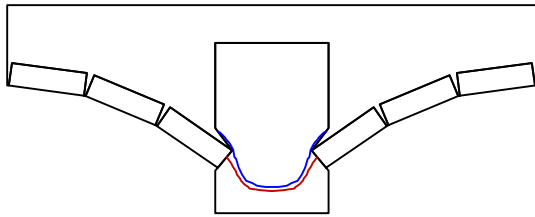
t=20 min



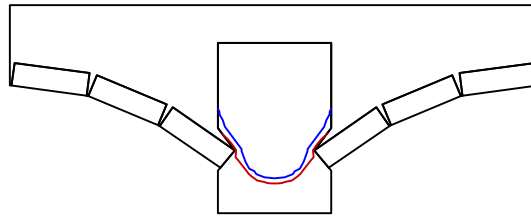
t=30 min



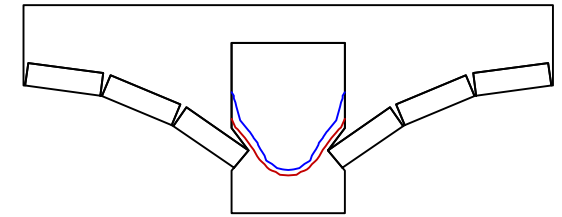
t=45 min



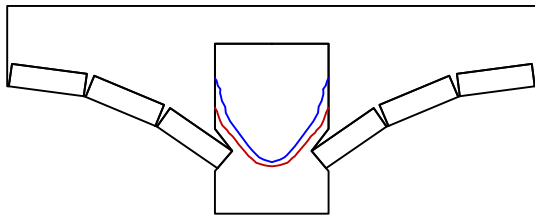
t=60 min



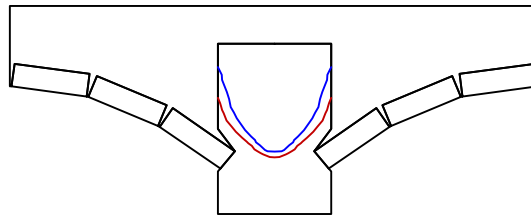
t=75 min



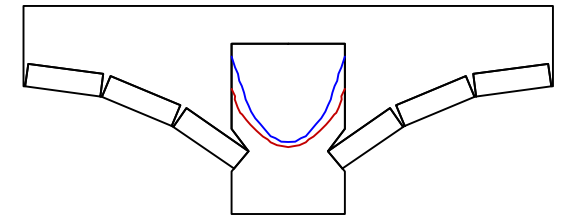
t=90 min



t=105 min



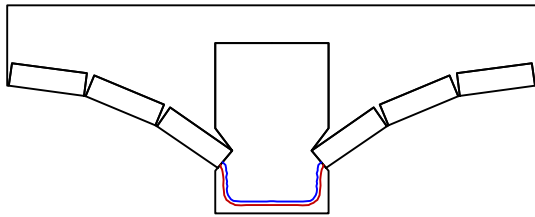
t=120 min



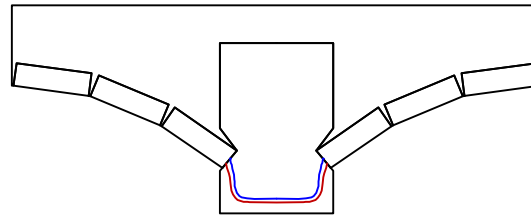
— Isoterma 135

— Isoterma 300

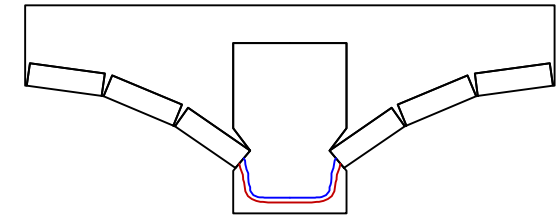
t=15 min



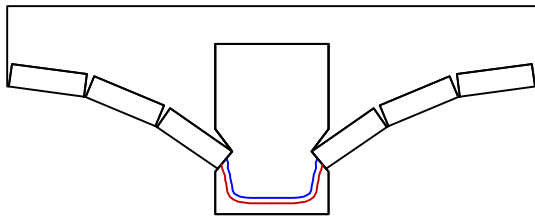
t=20 min



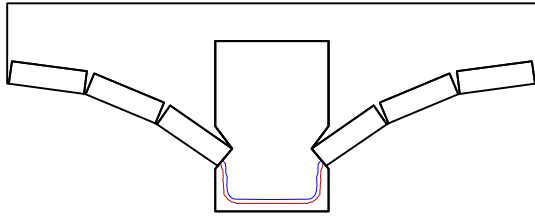
t=22 min



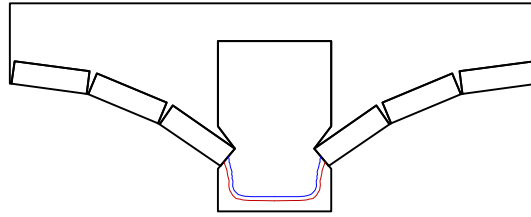
t=30 min



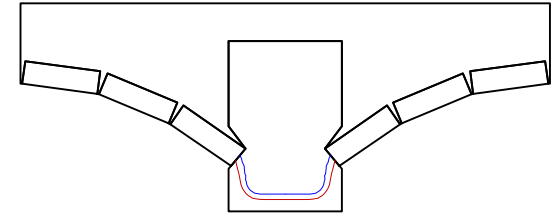
t=15 min



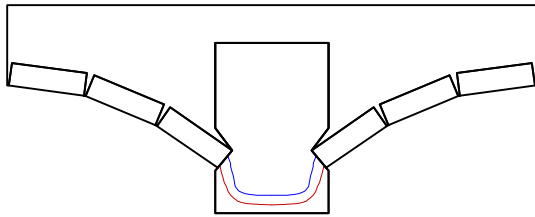
t=20 min



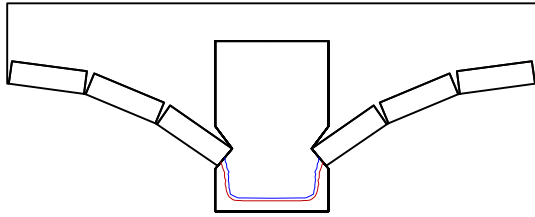
t=25 min



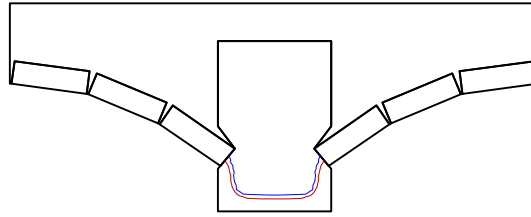
t=30 min



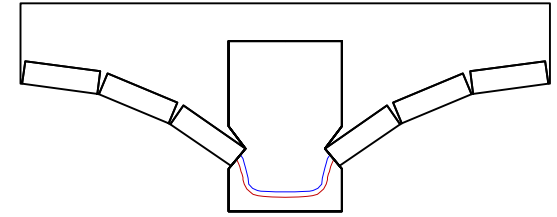
t=15 min



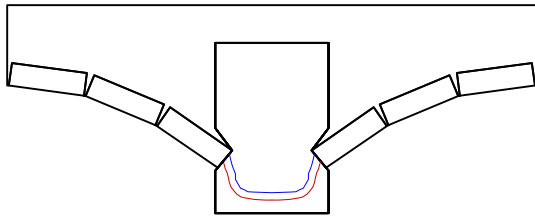
t=20 min



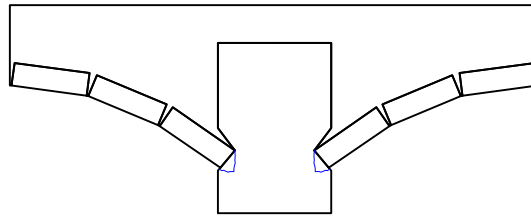
t=25 min



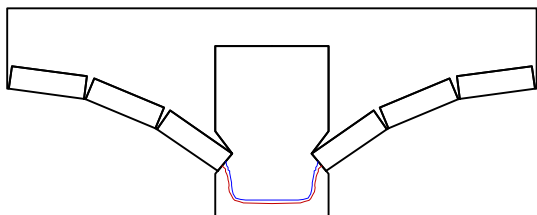
t=30 min



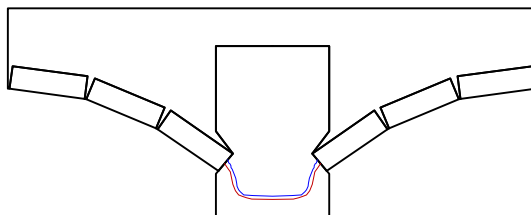
t=45 min



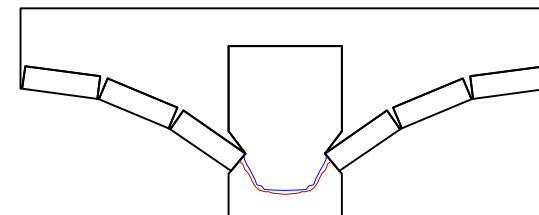
t=15 min



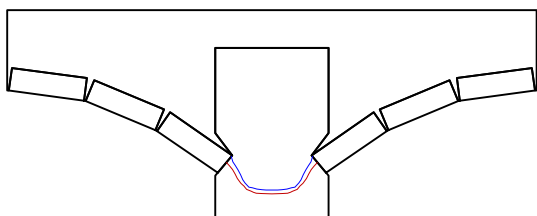
t=20 min



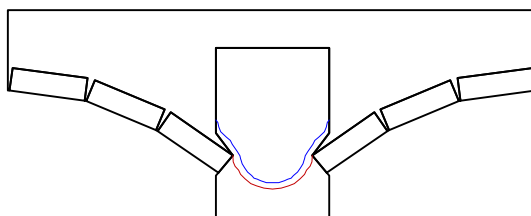
t=27 min 18 s



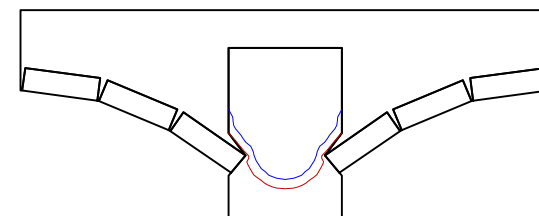
t=30 min



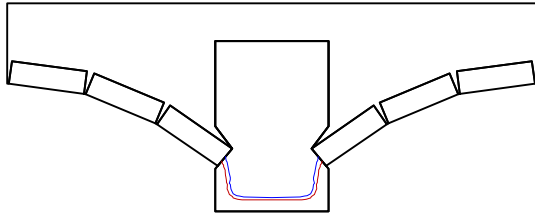
t=45 min



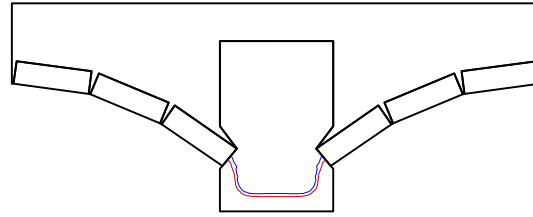
t=55 min



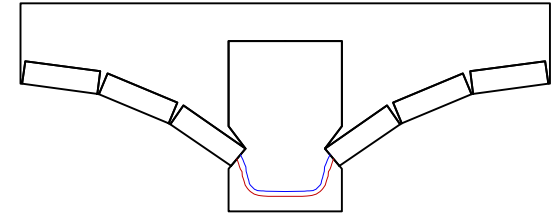
t=15 min



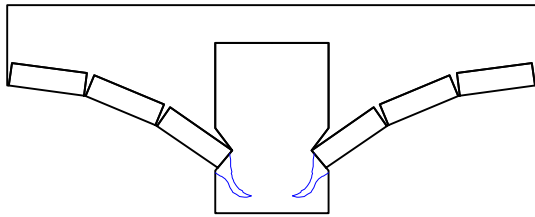
t=20 min



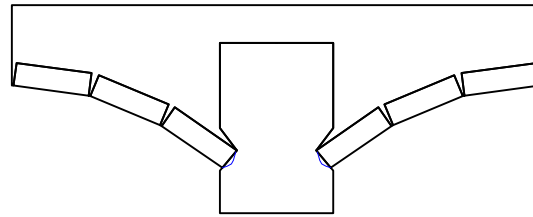
t=23 min



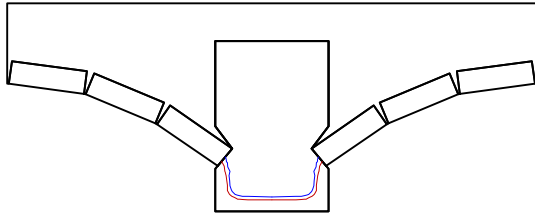
t=30 min



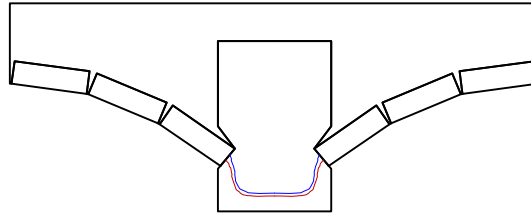
t=45 min



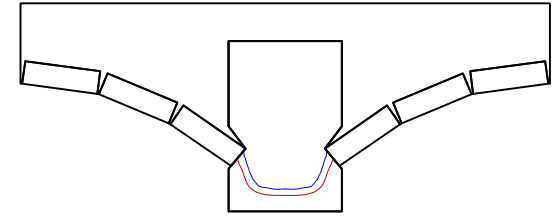
t=15 min



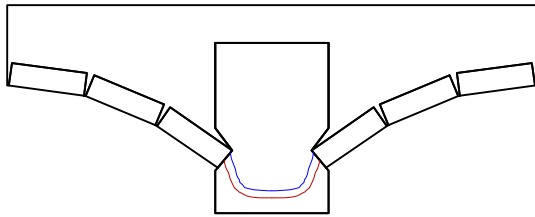
t=20 min

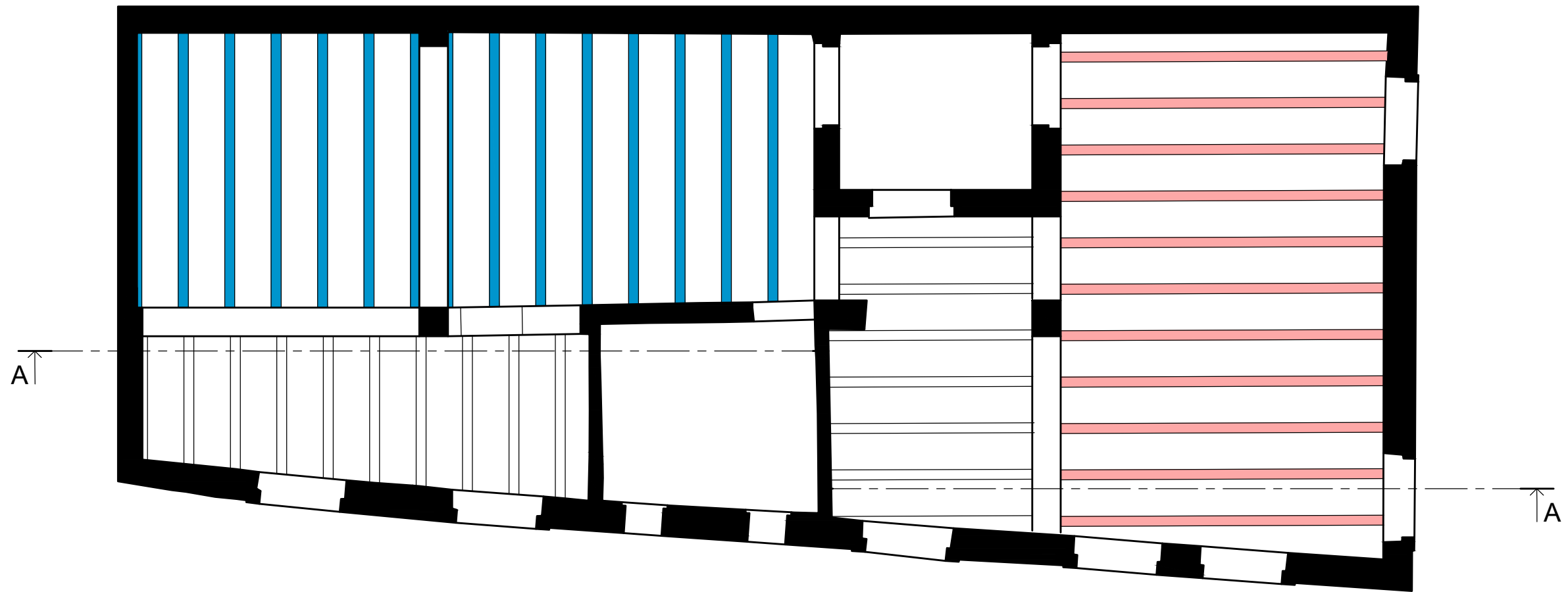


t=29 min

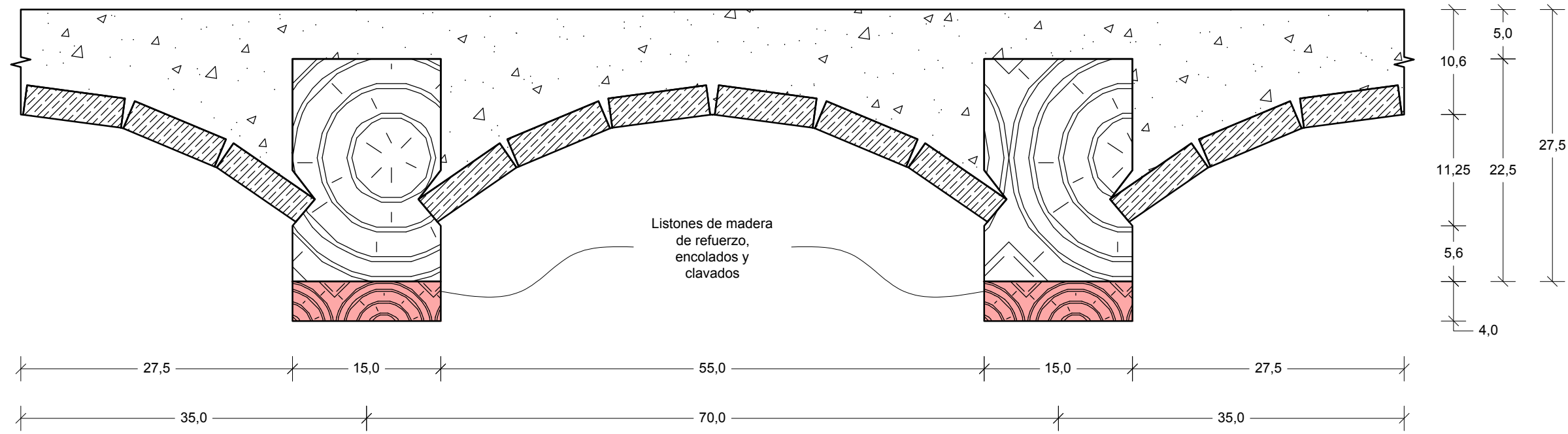
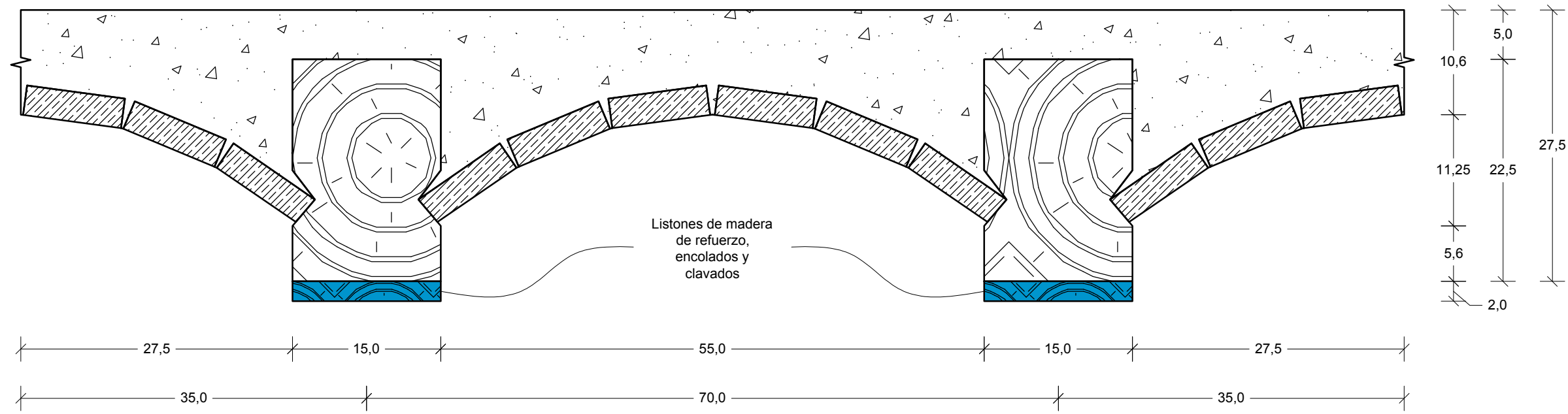


t=30 min





- Viguetas reforzadas con un listón de 2 cm
- Viguetas reforzadas con un listón de 4 cm



- Madera *Pino laricio*
- Ladrillos
- Mortero de cal

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	NORMA DE CLASIFICACIÓN
Madera <i>Pino laricio</i>	Calidad ME-2, Clase resistente C18	CTE DB-SE-M y UNE 56.544
Adhesivo	Adhesivo de fenol-formaldehido y aminoplásticos de tipo 1	EN 301
Clavos	$f_{ub}=600$ MPa ; d=6mm ; L=80-100mm	CTE DB-SE-M

Nota : La ejecución del refuerzo requiere apuntalar el forjado.