

STEEL BUILDINGS IN EUROPE

Edificios de acero de varias plantas

Parte 6: Ingeniería de fuego

Edificios de acero de varias plantas

Parte 6: Ingeniería de fuego

PRÓLOGO

Esta publicación es la parte 6 de la guía de diseño *Edificios de acero de varias plantas* (en inglés, *Multi-Storey Steel Buildings*).

Las 10 partes en que se divide la guía *Edificios de acero de varias plantas* son:

Parte 1: Guía del arquitecto

Parte 2: Diseño conceptual

Parte 3: Acciones

Parte 4: Diseño de detalle

Parte 5: Diseño de uniones

Parte 6: Ingeniería de fuego

Parte 7: Guía de prescripciones técnicas del proyecto

Parte 8: Herramienta para el cálculo de la resistencia de elementos: descripción técnica

Parte 9: Herramienta para el cálculo de la resistencia de uniones: descripción técnica

Parte 10: Guía para el desarrollo de software para el diseño de vigas mixtas

Edificios de acero de varias plantas, es una de las dos guías de diseño publicadas. La segunda guía se titula *Edificios de acero de una sola planta* (en inglés, *Single-Storey Steel Buildings*).

Ambas guías han sido editadas dentro del marco del proyecto europeo *Facilitating the market development for sections in industrial halls and low rise buildings* (SECHALO) RFS2-CT-2008-0030.

Ambas guías de diseño han sido redactadas y editadas bajo la dirección de Arcelor Mittal, Peiner Träger y Corus. El contenido técnico ha sido elaborado por CTICM y SCI, colaboradores de Steel Alliance.

Índice

	No. Página
PRÓLOGO	iii
RESUMEN	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
2 INGENIERÍA DE SEGURIDAD ANTE INCENDIO	3
2.1 Definición de ingeniería de seguridad ante incendio	3
2.2 Objetivos de la seguridad ante incendio	3
2.3 Enfoques de la ingeniería estructural contra incendios	5
3 SOLUCIONES DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS	15
3.1 Protección activa contra incendios	15
3.2 Protección pasiva contra incendios	16
3.3 Construcción resistente al fuego	20
4 MODELOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS	27
4.1 Comportamiento del fuego y acciones térmicas	27
4.2 Transferencia de calor	30
4.3 Análisis estructural	31
4.4 Métodos simplificados de cálculo estructural contra incendios	32
5 EFECTO MEMBRANA A TRACCIÓN	39
5.1 Ensayo de fuego Cardington	39
5.2 Ensayos de fuego FRACOF	42
6 USO DE LA EXPOSICIÓN A UN FUEGO NATURAL Y MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL AVANZADA	45
6.1 Aspectos generales	45
6.2 Modelización de la severidad del fuego	45
6.3 Modelización de la transferencia de calor	46
6.4 Modelos estructurales avanzados	46
6.5 Validación/verificación de los modelos avanzados	47
6.6 Aprobación de los cálculos	47
REFERENCIAS	48
BIBLIOGRAFÍA	48
Ejemplo resuelto: Estrategias de seguridad ante incendio y proyecto de cálculo de vigas	52

RESUMEN

Esta publicación ofrece a los ingenieros una amplia gama de estrategias y enfoques de dimensionamiento para cálculos de seguridad ante incendio en edificios de varias plantas. Incluye información previa y las bases de cálculo de la ingeniería de seguridad ante incendio. En ella se abordan diferentes formas constructivas, incluyendo elementos estructurales de acero protegidos y sin proteger, así como la construcción mixta. En términos de estrategias de seguridad ante el fuego, el lector encontrará pautas sobre la utilización de las protecciones activa y pasiva así como diferentes posibilidades de soluciones estructurales y de cálculos estructurales ante incendio.

En esta guía se describen los tres siguientes cálculos ante incendio:

- Uso de tablas y prontuarios publicados
- Modelos de cálculo simplificados según las normas EN 1993-1-2 y EN 1994-1-2
- Modelos de cálculo avanzados

El diseñador puede utilizar las tablas y prontuarios para asegurar la seguridad ante incendio de edificios de varias plantas. La utilización de los métodos de cálculo simplificados y el uso de métodos de cálculo avanzados posibilita la consecución de soluciones más económicas. Los métodos de cálculo avanzados se basan en principios de ingeniería y técnicas de elementos finitos, por lo que se suele requerir la intervención de ingenieros especialistas para poder aplicar dichos métodos.

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas del cálculo de edificios modernos de varias plantas es la seguridad contra incendios. El término *seguridad contra incendios* describe las precauciones necesarias para minimizar la probabilidad y las consecuencias de un incendio, que podría derivar en lesiones, el fallecimiento de personas y daños materiales a la propiedad. En la Figura 1.1 se recogen ejemplos de incendios en edificios de varias plantas.

Los objetivos generales del cálculo ante incendios son proteger la vida, tanto la de los ocupantes del edificio como la de los bomberos, y minimizar la interrupción de las actividades empresariales, los desperfectos en los bienes materiales, los contenidos del edificio y su entorno.



Figura 1.1 Incendios en edificios de varias plantas

Con el fin de alcanzar estos objetivos, la Directiva 89/106/CEE^[1] sobre productos de construcción establece en el *Anexo I – Requisitos esenciales* que, en caso de incendio, para preservar la seguridad:

“Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que, en caso de incendio:

- la capacidad de sustentación de la obra se mantenga durante un período de tiempo determinado;
- la aparición y propagación del fuego y del humo dentro de la obra estén limitados;
- la propagación del fuego a obras vecinas esté limitada;
- los ocupantes puedan abandonar la obra o ser rescatadas por otros medios;
- se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.”

Para cumplir los requisitos reglamentarios, el trabajo en equipo de ingenieros, arquitectos, contratistas, fabricantes y proveedores en el cálculo ante incendio de edificios de varias plantas es esencial. A pesar de que ya en el diseño

arquitectónico se consideran muchos aspectos importantes, los ingenieros han de tener en cuenta la seguridad contra incendios con especial hincapié en la ingeniería estructural en situación de incendio. En algunos casos, los ingenieros tendrán que recurrir a una amplia gama de estrategias contra incendios y métodos de cálculo para garantizar que el proyecto cumple todos los requisitos de seguridad contra incendios obligatorios.

Las partes de los Eurocódigos que resultan de aplicación en el cálculo ante incendios de edificios de varias plantas con estructura de acero y forjados mixtos son las siguientes:

- EN 1991-1-2, Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego^[2]
- EN 1993-1-2, Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de Acero. Reglas generales. Estructuras expuestas al fuego^[3]
- EN 1994-1-2, Eurocódigo 4. Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego^[4].

Además de los requisitos, principios y reglas generales, estos documentos también proporcionan los valores recomendados para los coeficientes parciales y los valores de cálculo de los efectos de las acciones en situación de incendio. Proporcionan una serie de ecuaciones o modelos para el cálculo del aumento de temperatura, temperatura crítica y resistencia de los elementos estructurales sometidos a fuego.

Esta guía dota a los ingenieros de una amplia gama de estrategias de seguridad ante incendios para el proyecto de edificios de varias plantas. Para aquellos proyectistas con menos experiencia, la presente publicación ofrece una guía para el uso de tablas y prontuarios para garantizar el cumplimiento de los requisitos legales de seguridad contra incendios. Para aquellos profesionales con más experiencia se proporcionan los modelos de cálculo simplificados de los Eurocódigos, que se pueden aplicar de manera sencilla y constituyen una solución más económica.

2 INGENIERÍA DE SEGURIDAD ANTE INCENDIO

En esta sección se describen los principios básicos del cálculo ante incendio, con especial hincapié en la resistencia al fuego y los métodos de cálculo de edificios de varias plantas, con el fin de garantizar los niveles de seguridad que exige la legislación nacional.

2.1 Definición de ingeniería de seguridad ante incendio

La ingeniería de seguridad ante incendio es una ciencia multidisciplinar que aplica principios científicos y de ingeniería con el fin de proteger del fuego a las personas, los bienes materiales y el medio ambiente. La ingeniería estructural contra incendios constituye una pequeña parte de la ingeniería de seguridad ante incendio.

2.2 Objetivos de la seguridad ante incendio

El objetivo de la seguridad ante incendio es limitar el riesgo de pérdidas derivadas de un incendio. Las pérdidas pueden definirse en términos de fallecimientos o lesiones provocadas a los ocupantes de un edificio o a los bomberos, pérdidas económicas ocasionadas por daños en los contenidos del edificio o interrupción de la actividad empresarial y pérdidas medioambientales debidas al agua contaminada que se ha utilizado para extinguir el incendio o la emisión a la atmósfera de sustancias perniciosas.

Las normativas nacionales por lo general establecen requisitos mínimos de seguridad ante incendio con el fin de proporcionar un nivel adecuado de salvaguardia de la vida, pero el cliente, la aseguradora del edificio o la agencia estatal de protección medioambiental, también pueden exigir la limitación de los riesgos de pérdidas económicas y medioambientales.

El nivel de seguridad requerido viene definido en las normativas nacionales. A pesar de que estas normativas pueden variar de un estado miembro a otro, todas ellas tienen como fin dar respuesta a los objetivos básicos definidos por la Directiva 89/106/CEE^[1] sobre productos de construcción:

“Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que, en caso de incendio:

- la capacidad de sustentación de la obra se mantenga durante un período de tiempo determinado;
- la aparición y propagación del fuego y del humo dentro de la obra estén limitados;
- la propagación del fuego a obras vecinas esté limitada;
- los ocupantes puedan abandonar la obra o ser rescatadas por otros medios;

- se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.”

A pesar de que la resistencia estructural al fuego no puede dar respuesta a todos estos objetivos de seguridad, se considera una parte fundamental de la estrategia de seguridad contra incendios de un edificio.

2.2.1 Ingeniería estructural contra incendios

La ingeniería estructural contra incendios puede definirse como una disciplina específica dentro del ámbito de la ingeniería de seguridad ante incendio relativa al análisis del comportamiento estructural durante un incendio.

Los fundamentos del cálculo ante incendios para las estructuras de los edificios se definen en la norma EN 1990, donde se establece que el cálculo ante incendios debería basarse en el desarrollo del fuego, la respuesta térmica y el comportamiento mecánico. El comportamiento requerido de la estructura puede determinarse mediante un análisis global, de las sub-estructuras o de los elementos, así como por el uso de datos tabulados, obtenidos mediante análisis o ensayos.

Considerando el comportamiento del fuego se pueden definir las acciones térmicas a las que se verán expuestos los elementos estructurales. En el enfoque prescriptivo, la acción térmica puede determinarse utilizando la curva nominal tiempo-temperatura definida en la norma EN-1991-1-2. Para edificios se suele utilizar la curva estándar tiempo-temperatura (la curva ISO).

Tras haber determinado las acciones térmicas, se considera la respuesta térmica de la estructura mediante un método de análisis de la transferencia del calor adecuado, para determinar el historial temperatura-tiempo de la estructura.

Por último, el comportamiento mecánico de un elemento puede evaluarse mediante análisis o ensayo, con el fin de determinar su resistencia dado el historial temperatura-tiempo.

Según la función que desempeñe un elemento estructural, la aceptabilidad de su comportamiento mecánico puede evaluarse según uno o varios de los criterios siguientes, evaluándolos en base a su análisis o a ensayos de resistencia al fuego.

- *Función portante (R)*: aptitud de una estructura o de un elemento estructural para soportar las acciones especificadas durante la exposición prevista al fuego, conforme a criterios establecidos.
- *Aislamiento (E)*: aptitud de un elemento separador de un edificio, cuando está expuesto al fuego por una cara, para limitar la elevación de la temperatura en la cara no expuesta por debajo de valores establecidos de 140°C (media) y 180°C (máximo).
- *Integridad (I)*: aptitud de un elemento separador de un edificio, cuando está expuesto al fuego por una cara, de impedir el paso de las llamas y de los gases calientes a su través y de impedir la aparición de llamas en la cara no expuesta.

Las normativas nacionales señalan cada una de las tres categorías anteriores mediante la letra de referencia que se indica seguida del requisito del tiempo. Por ejemplo, un requisito de la función portante de 60 minutos para un elemento concreto se expresaría como R60.

La función portante (*R*) es un requisito para todos los elementos estructurales. No obstante, el aislamiento (*E*) y la integridad (*I*) sólo son necesarios para elementos separadores, como por ejemplo las losas los forjados y las particiones, que forman los límites de compartimentación resistentes al fuego.

2.3 Enfoques de la ingeniería estructural contra incendios

La ingeniería estructural ante incendio puede llevarse a cabo mediante métodos prescriptivos, en los que los períodos de resistencia al fuego se definen en las normativas nacionales, o mediante métodos basados en prestaciones, en los que se cuantifica el nivel de riesgo y se demuestra que es aceptable. La aceptación de los métodos basados en prestaciones depende de las autoridades reguladoras nacionales, a quienes se debe consultar en una fase preliminar del proyecto. La Tabla 2.1 muestra las herramientas disponibles para cada enfoque.

Tabla 2.1 Métodos de cálculo ante incendio

Enfoque	Herramientas	Acciones de fuego (acciones térmicas)	Efectos del fuego (Temperatura del elemento)	Resistencia al fuego (Resistencia del elemento)
Enfoque prescriptivo (métodos con fuego estándar)	Tablas publicadas	Ensayos según la curva estándar ISO: <ul style="list-style-type: none"> EN 1363-1, § 5 EN 1365-2, § 5 	Información de interés: <ul style="list-style-type: none"> Suministrada por fabricantes de protección ante incendio documentos de Access-Steel norma EN 1994-1-2, § 4.2 	
	Reglas y modelos simplificados	Cálculos de incendio ISO estándar para EN 1991-1-2, §3.2	Elementos de acero según la EN 1993-1-2 § 4.2.5 Elementos mixtos según la EN 1994-1-2 Anexo D2, § 4.3.4.2.2	§ 4.2.3 § 4.2.4 Anexo E – F, § 4.3.1 § 4.3.4.2.4 § 4.3.4.2.3
	Reglas y modelos avanzados		Considerar la interacción entre elementos estructurales y efecto membrana a tracción Modelos físicos de la transferencia de calor Análisis mediante elementos finitos	Modelos físicos de la respuesta estructural Análisis mediante elementos finitos
Enfoque basado en prestaciones (métodos de fuego natural)	Reglas y modelos simplificados	Fuego paramétrico Fuego localizado	Elementos de acero según la EN 1993-1-2 § 4.2.5	§ 4.2.3 § 4.2.4
	Reglas y modelos avanzados	Fuego natural según EN1991-1-2, § 3.3, Anexos A a F Fuego localizado, zonas, CFD	Considerar la interacción entre elementos estructurales y efecto membrana a tracción Modelos físicos de la transferencia de calor Análisis de elementos finitos	Modelos físicos de la respuesta estructural Análisis mediante elementos finitos

2.3.1 Enfoque prescriptivo

El enfoque prescriptivo constituye el método tradicional y, así y todo, el más frecuentemente utilizado. Su único objetivo consiste en proporcionar niveles adecuados seguridad, de manera que se cumplan los requisitos de resistencia al fuego establecidos en las normativas nacionales de edificación. Los reglamentos prescriptivos contienen requisitos encaminados a garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos en la Sección 2.2.

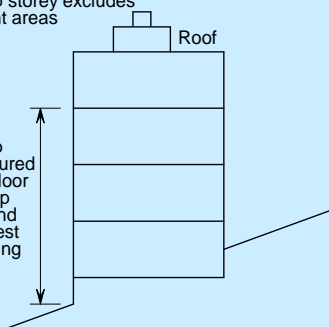
Resistencia estructural al fuego

Según los reglamentos prescriptivos los edificios han de subdividirse mediante elementos resistentes al fuego en sectores de incendio. Los requisitos delimitan el tamaño máximo de cada sector y recomiendan los requisitos de resistencia al fuego que deberían cumplir los elementos estructurales delimitadores. La compartimentación de un edificio de varias plantas de manera horizontal y vertical en una serie de sectores de incendio, limitará la propagación de fuego y humo en el interior del edificio, dando así a los ocupantes más tiempo para evacuar. En algunas normativas nacionales se permite una relajación de los límites del tamaño de los sectores si el edificio está equipado con un sistema de rociadores.

Por lo general, los requisitos de resistencia estructural al fuego se definen en función del periodo de tiempo durante el cual una estructura o elemento estructural debe comportarse adecuadamente comparándolo con los criterios de función portante, aislamiento e integridad.

Los requisitos de resistencia al fuego en edificios de varias plantas suelen especificarse con relación al uso y la altura del edificio, tal y como se indica en la Tabla 2.2. Normalmente, los requisitos de resistencia al fuego en edificios de varias plantas son de entre 60 minutos (R60) y 120 minutos (R120). Sin embargo, ciertas normativas nacionales requieren hasta cuatro horas de resistencia al fuego. Si un edificio está equipado con un sistema de rociadores, el período de resistencia al fuego necesario para los elementos estructurales según las normativas prescriptivas puede verse reducido.

Tabla 2.2 Requisitos típicos de resistencia al fuego

	Resistencia al fuego (min.) Según la altura de la última planta (m)				
	<5	≤18	≤30	>30	
Residencial (no doméstico)	30	60	90	120	<div>Height of top storey excludes roof-top plant areas</div> <div>Roof</div> <div>Height of top storey measured from upper floor surface of top floor to ground level on lowest side of building</div> 
Oficinas	30	60	90	120*	
Tiendas, centros comerciales, locales de reunión y de espectáculo	30	60	90	120*	
Garajes cerrados	30	60	90	120	
Garajes abiertos	15	15	15	60	
* Se precisan rociadores, pero la resistencia al fuego del forjado puede ser de tan sólo 90 minutos.					

Esta tabla está basada en la práctica británica. Los requisitos pueden variar en otros países europeos.

Como ejemplo de las diferencias existentes en los requisitos contra incendios, la normativa alemana establece que los aparcamientos abiertos de varias plantas en Alemania no requieren ningún tipo de resistencia al fuego (R0).

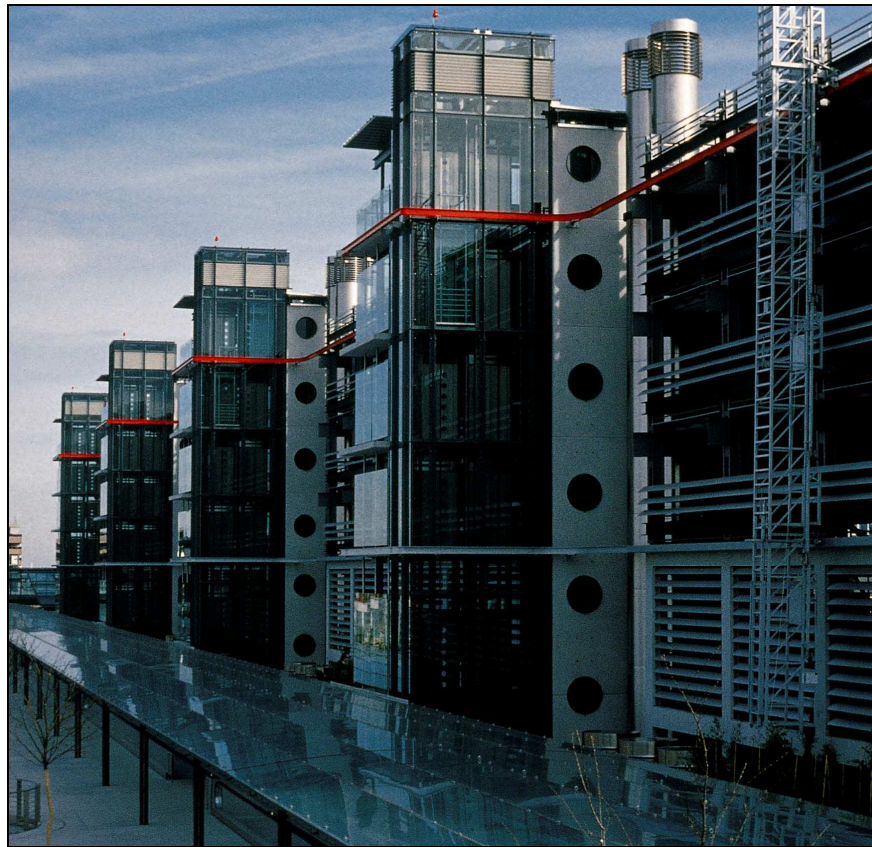


Figura 2.1 Aparcamiento abierto multi-planta sin protección adicional en Alemania (R0)

Al adoptar un enfoque prescriptivo, no se requiere modelización del comportamiento del fuego y las acciones térmicas se basan en la curva estándar temperatura-tiempo (curva ISO).

Los cálculos de transferencia del calor utilizados para determinar la curva temperatura-tiempo de la estructura son iterativos y suelen requerir algún tipo de automatización. Las normas EN 1993-1-2^[3] y EN 1994-1-2^[4] ofrecen ecuaciones simplificadas para perfiles de acero protegidos y sin proteger. También hay disponibles varios software comerciales basados en elementos finitos o en diferencias finitas. Para elementos estructurales mixtos de acero-hormigón, los métodos de cálculo de los Anexos informativos de la norma EN 1994-1-2 incluyen datos tabulados que eliminan la necesidad de un análisis de la transferencia del calor. Sin embargo, estos métodos tienen un alcance limitado.

El cumplimiento de los requisitos prescriptivos puede demostrarse mediante análisis, resultados tabulares basados en el ensayo y/o el análisis, o resultados de ensayos ante incendios estándar individuales.

El análisis estructural puede basarse en modelos simples de ingeniería que consideran elementos estructurales individuales o en modelos de elementos finitos que permiten analizar estructuras completas o partes de las mismas.

Datos tabulares

Los datos tabulares sobre el comportamiento del fuego pueden proporcionar información genérica o de un producto específico. Los datos tabulares genéricos correspondientes a las estructuras de acero y estructuras mixtas acero-hormigón se pueden consultar las normas EN 1993-1-2 y EN 1994-1-2. El método de la temperatura crítica descrito en la norma EN 1993-1-2 incluye datos de temperatura crítica expresados en función del grado de utilización. Los datos de cálculo de una serie de vigas y pilares mixtos de acero y hormigón también se indican en formato tabular en la norma EN 1994-1-2.

También hay disponibles datos de productos comerciales específicos para materiales de protección contra incendios aplicables a la construcción en acero estructural. El espesor de protección necesario suele expresarse en términos del período de resistencia al fuego requerido, el factor de forma y la temperatura crítica. Otros productos de construcción, como por ejemplo las chapas para forjados colaborantes también incluyen tablas de cálculo específicas.

Modelos de cálculo simplificados

Como alternativa a los datos tabulados, se puede optar los cálculos simplificados para determinar la resistencia de un elemento tras un período específico de exposición al fuego. La acción del fuego se determina de la curva estándar temperatura-tiempo de los Eurocódigos. La resistencia del elemento depende del nivel de carga aplicado y de la pérdida de resistencia del material expuesto al fuego, y se calcula de acuerdo con las ecuaciones establecidas en los Eurocódigos.

Los modelos de cálculo simplificados resultan los más prácticos para justificar un diseño de acero sin proteger, normalmente, para requisitos de resistencia al fuego R30 o inferior. Cuando se precisan estructuras de acero protegidas, los datos tabulados que proporcionan los fabricantes de protección ante incendios resultan más eficaces.

Los modelos de cálculo simplificados presentan la desventaja de que su aplicación está limitada a elementos estructurales individuales y no considera la interacción entre el elemento estructural y la estructura que lo rodea.

Modelos de cálculo avanzados

Los modelos de cálculo avanzado se basan en fundamentos de ingeniería y en técnicas de elementos finitos para llevar a cabo un cálculo estructural ante incendios. Las respuestas térmicas y estructurales a las acciones del fuego pueden determinarse mediante el uso de modelos físicos avanzados.

Este tipo de análisis suele resultar en una solución más económica que el enfoque prescriptivo y los modelos de cálculo simplificados. Gracias a este método los diseñadores pueden desarrollar soluciones más innovadoras a la hora de construir estructuras, lo cual a menudo permite dejar algunos elementos de acero sin proteger sin comprometer la resistencia de la estructura al fuego.

Los modelos de cálculo avanzado precisan la realización de una cantidad considerable de cálculos y su aplicación requiere cierta experiencia en cuanto a ingeniería estructural ante incendios y técnicas de elementos finitos.

Clasificación de los materiales de revestimiento

Las normativas nacionales establecen controles sobre los materiales utilizados como revestimiento para las paredes y los techos de los edificios. Dichos materiales deben resistir la propagación de las llamas a través de las superficies y no contribuir de manera significativa al fuego en cuanto a emisión de calor o de humo. Los materiales de revestimiento se clasifican en base a los resultados de ensayos de fuego.

Propagación externa del fuego

A la hora de controlar el alcance de un incendio, las normativas nacionales suelen exigir que se tenga en cuenta el potencial del fuego para propagarse entre edificios. En algunos casos, los requisitos de la resistencia al fuego de los muros externos dependen de la distancia entre edificios, lo cual pone de manifiesto que el calor irradiado es el principal riesgo de incendio para el edificio adyacente. Cuanto mayor sea el espacio entre dos edificios, menor será la intensidad del flujo de calor.

Medios de evacuación

Las normativas prescriptivas también requieren la existencia de vías de evacuación para permitir que los ocupantes puedan llegar a un sitio protegido fuera del edificio en caso de incendio. En función del uso que se le dé al edificio y del posible número de ocupantes, las normativas pueden prescribir el número de salidas necesarias, la anchura de las escaleras o de los pasillos que vayan a servir de vías de evacuación y el recorrido máximo desde el punto más remoto del edificio.

La Tabla 2.3 ofrece una apreciación de la importancia de los recorridos de evacuación para escaleras de emergencia. Los recorridos de evacuación máximos pueden variar de un país a otro.

Tabla 2.3 Recorridos de evacuación máximos típicos (m) hasta zonas protegidas o a las escaleras de evacuación

Tipo de edificio	Una dirección	Más de una dirección
Residencial	9	18
Oficinas	18	45
Comercial	18	45

El diseño de las vías de evacuación influye en la distribución del edificio en planta en cuanto a la localización de las puertas, pasillos y especialmente el número de escaleras y su ubicación en el edificio.

Acceso para los bomberos

Las normativas prescriptivas exigen que se proporcione el acceso y las instalaciones necesarias para los bomberos, de manera que éstos puedan llevar a cabo las operaciones de extinción del fuego y de rescate. En los edificios de varias plantas, puede existir el requisito de un espacio de maniobra para los bomberos, que incluye escaleras y/o ascensores, para proporcionar a los bomberos el acceso de efectivos y equipamiento al piso afectado por el fuego. El espacio de maniobra puede contener también un suministro de agua para llevar a cabo las operaciones de extinción de incendios. Dicho espacio estará diseñado de manera que proporcione a los bomberos un lugar de seguridad

relativa desde el que puedan poner en marcha las operaciones de extinción del fuego en el lugar afectado por el incendio. El espacio de maniobra suele ocupar una superficie mayor que los huecos de una escalera o ascensor normales, por lo que estos requisitos pueden influir de manera importante en el diseño del edificio y han de considerarse en las primeras fases del proyecto. La zona que circunda el edificio también debe permitir el acceso a los vehículos de emergencias, normalmente a una distancia razonable del suministro de agua para la extinción de incendios.

2.3.2 Enfoque basado en prestaciones

Cualquier procedimiento de cálculo ante incendios basado en prestaciones debería estar documentado de forma clara, de manera que la filosofía y las asunciones resulten claramente comprensibles para un tercero ajeno al diseñador. El procedimiento puede incluir los siguientes pasos:

- Revisar el diseño arquitectónico del edificio
- Establecer objetivos de seguridad ante incendios
- Identificar riesgos de incendio y sus posibles consecuencias
- Establecer posibles estrategias de seguridad ante el fuego
- Identificar criterios de aceptación y métodos de análisisEstablecer situaciones hipotéticas de incendio para su análisis

Revisar diseño arquitectónico

Esta revisión debería tener como objetivo la identificación de cualquier requisito arquitectónico o por parte del cliente que pueda resultar importante a la hora de desarrollar una solución de seguridad ante el fuego. Por ejemplo:

- El uso futuro del edificio y lo que se prevé que contendrá, así como las acciones permanentes, variables y térmicas que se prevén.
- El tipo de estructura y la distribución de los espacios del edificio
- La presencia de sistemas de ventilación o sistemas de rociadores
- Las características de los ocupantes así como su número y distribución
- El tipo de sistema de detección de incendios y de alarma
- El grado de gestión del edificio durante toda la vida útil del mismo (por ejemplo, mantenimiento activo de las medidas de seguridad ante incendios o asegurarse de que no se acumulen materiales combustibles en zonas críticas).

Objetivos de seguridad ante incendio

Los objetivos de seguridad ante el fuego deben identificarse claramente en una fase temprana del proceso de cálculo. Este proceso deberá llevarse a cabo, para obtener los mejores resultados, de manera conjunta con el cliente, la administración pública competente y otras partes interesadas.

Los principales objetivos de seguridad ante incendio son la salvaguardia de la vida, el control de las pérdidas económicas y la protección del medioambiente.

Los objetivos para la salvaguardia de la vida ya vienen definidos en las normativas prescriptivas, pero deberían incluir disposiciones para garantizar que los ocupantes de un edificio puedan evacuarlo con una seguridad razonable, que los bomberos puedan trabajar en unas condiciones razonablemente seguras y que la posibilidad de derrumbamiento no ponga en peligro a las personas que puedan encontrarse en las proximidades del edificio.

Los efectos del fuego en cuanto a la viabilidad de la continuidad de una actividad empresarial pueden ser importantes, por lo que deberían tenerse en cuenta con el fin de minimizar el daño a la estructura y el tejido del edificio, los contenidos del mismo, la viabilidad de la continuidad de la actividad empresarial y la imagen corporativa. El nivel de precauciones que se consideran necesarias en un edificio concreto dependerá del tamaño y la naturaleza de las actividades comerciales que se desarrollen en él. En algunos casos, puede resultar sencillo reubicar la actividad empresarial en otras instalaciones sin que se produzca una interrupción seria. En otros casos, la actividad empresarial puede verse interrumpida hasta que el edificio esté listo para ser ocupado de nuevo. Muchas empresas que sufren un incendio en sus instalaciones acaban en bancarrota antes de volver a retomar su actividad empresarial.

Una explosión fuerte que emita materiales perniciosos al medio ambiente puede tener un fuerte impacto en el mismo. La contaminación puede dispersarse a través del aire o del agua, como resultado de las importantes cantidades de agua que se necesitan durante las operaciones de extinción de incendios.

Identificar riesgos de incendio y sus posibles consecuencias

Dentro de la revisión de riesgos de incendio potenciales se pueden incluir las fuentes de ignición, el volumen y distribución de materiales combustibles, las actividades que se llevan a cabo en el edificio y cualquier otro factor poco habitual. A la hora de evaluar la importancia de estos riesgos, es preciso tener en cuenta las posibles consecuencias y el impacto que estas tendrán para poder conseguir los objetivos de seguridad ante incendios.

Posibles estrategias de seguridad contra incendios

Con el fin de cuantificar el nivel de seguridad contra incendios conseguido, se deberían sugerir una o varias estrategias posibles de seguridad para el edificio. Dichas estrategias por lo general serán las más económicas que respondan a los objetivos de seguridad ante incendios.

La estrategia de seguridad ante incendios consiste en un paquete integrado de medidas en el diseño de edificios de varias plantas. Los siguientes puntos deberían tenerse en cuenta a la hora de desarrollar una estrategia de seguridad ante incendios:

- Medidas automáticas de supresión (por ejemplo, sistemas de rociadores) para limitar la posibilidad de la propagación del fuego y el humo
- Sistemas automáticos de detección, que proporcionan un aviso temprano del incendio

- División del edificio en sectores de incendio mediante una construcción resistente al fuego y la existencia de elementos estructurales resistentes al fuego, para garantizar así la estabilidad estructural
- Existencia de un número adecuado de vías de evacuación (con recorridos de evacuación y anchura razonables) que tengan en cuenta el número de ocupantes que puede albergar el edificio en cualquier momento
- Sistemas automáticos como, por ejemplo, puertas o persianas ante incendios con cierre automático, para controlar la propagación del humo y de las llamas
- Sistemas automáticos de control del humo para garantizar la existencia de vías de evacuación exentas de humo
- Sistemas de alarma y aviso para alertar a los ocupantes del edificio
- Estrategias de evacuación
- Equipo contra incendios de primeros auxilios
- Instalaciones para los bomberos
- Gestión de la seguridad contra incendios

Establecer criterios de aceptación y métodos de análisis

Los criterios de comportamiento aceptable para el cálculo basado en prestaciones se centrarán en el análisis global de una estrategia contra incendios determinada. Los criterios tienen que evaluarse y establecerse, tras ser discutidos por el diseñador y el cliente, por medio de enfoques comparativos, deterministas o probabilistas.

En un enfoque comparativo se evalúa el nivel de seguridad contra incendios obtenido por el cálculo basado en prestaciones en relación con el nivel del enfoque prescriptivo, con el fin de garantizar un nivel equivalente de seguridad contra incendios. En un enfoque determinista el objetivo consiste en cuantificar los efectos de la peor hipótesis posible de incendio y demostrar que dichos efectos no se quedarán fuera de los criterios de aceptación definidos. En un enfoque probabilista se pretende poner de relieve que la estrategia de seguridad contra incendios hace que la posibilidad de que ocurran grandes pérdidas sea lo suficientemente pequeña como para ser aceptable.

Establecer hipótesis de incendios

El número de posibles situaciones de incendio en cualquier edificio puede ser amplio y los recursos para analizarlos en su totalidad no siempre están disponibles. Por ello, el análisis detallado debe limitarse a las situaciones de incendio más significativas o, como a veces se le suele denominar, al peor de los casos. El fallo de los sistemas de protección también debería incluirse en las hipótesis de incendios que se consideran. En la mayor parte de los edificios habrá que hacer un análisis detallado de más de una situación de incendio.

2.3.3 Elección del enfoque óptimo

Elegir el enfoque óptimo para el cálculo ante incendios de edificios de varias plantas depende de diversos parámetros, tales como la geometría, las características estructurales, la función de servicio y el conocimiento de los

diseñadores en el campo del cálculo ante incendios. La Tabla 2.4 ofrece algunas sugerencias sobre el enfoque que puede resultar en una solución más económica.

En términos generales, para los edificios de baja altura con una superficie pequeña la utilización de datos tabulados puede resultar la opción óptima. Para edificios altos con una superficie grande (o si se desea tener en cuenta las ventajas de las medidas de protección activa), puede ser más ventajoso utilizar los modelos de cálculo avanzado. Para la mayoría de los edificios de tamaño medio, los modelos de cálculo simplificados pueden ser la solución óptima.

Tabla 2.4 Elección del método ideal para el diseño ante incendio

Características del edificio	Fichas de datos	Modelos de cálculo simple	Modelos de cálculo avanzado
1 Tamaño del edificio – superficie por planta, A			
Pequeño: $A < 200 \text{ m}^2$	✓✓		
Mediano: $200 \text{ m}^2 < A < 2.000 \text{ m}^2$	✓✓		
Grande: $A < 2.000 \text{ m}^2$	✓	✓	✓
2 Altura del edificio – número de plantas, n			
Bajo $n \leq 5$	✓✓	✓	
Alto $n > 6$	✓	✓	✓

✓✓ Solución más económica

✓ Probablemente una solución económica

El uso de medidas activas de protección contra el fuego, como detectores, alarmas o rociadores, resulta beneficiosa si se utilizan métodos de cálculo avanzados. Algunas normativas nacionales y/o autoridades locales permiten la reducción de las cargas de fuego cuando estas medidas están presentes.

La posibilidad de utilizar la colaboración de especialistas en cálculo ante incendios facilita el uso de métodos avanzados. Sin embargo, para aquellos diseñadores que no tengan experiencia en el campo, el uso de los métodos simplificados o de datos tabulados puede hacer que el proyecto sea más económico, puesto que se pueden producir importantes ahorros en los gastos de diseño.

En este sentido, la Tabla 2.5 describe el enfoque recomendado que se debería adoptar en función de las aptitudes del diseñador e indica la sección de esta guía en la que se puede consultar la información pertinente.

Tabla 2.5 Impacto de las aptitudes del proyectista en la solución ante incendio

Conocimientos en cálculos de ingeniería ante incendio	Enfoque de cálculo recomendado (sección de esta guía que aborda el método)
No experto	Protección activa contra incendios (3.1) Protección pasiva contra incendios (3.2) Soluciones alternativas resistentes al fuego (3.3)
Conocimientos limitados	Métodos de cálculo simplificados (4) Efecto membrana a tracción (5)
Experto	Métodos de cálculo avanzados (6)

3 SOLUCIONES DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

3.1 Protección activa contra incendios

Las medidas de protección activa contra incendios incluyen los detectores, alarmas y rociadores, que detectan fuego o humo y lo extinguen en sus inicios.

Estos sistemas de protección contra incendios pueden influir de manera significativa en el nivel de salvaguardia de la vida y protección de los bienes que se puede obtener en un edificio. Las normativas prescriptivas normalmente requieren la instalación de sistemas de detección y alarma, los cuales, junto con los rociadores, suelen constituir una parte importante de la estrategia de seguridad contra incendios en los cálculos basados en prestaciones.

3.1.1 Detectores y alarmas

Estos dispositivos, que forman parte de una estrategia basada en medidas de protección activa contra incendios, detectan el calor, el humo y las llamas. Los sistemas de alarma de incendios están diseñados para indicar a los ocupantes que deben evacuar el edificio porque se ha provocado un incendio. La Figura 3.1 muestra un detector y un dispositivo de alarma típicos.



Figura 3.1 Detector y dispositivo de alarma de incendios

3.1.2 Rociadores de agua

Los rociadores son dispositivos que, de manera automática, extinguen un pequeño incendio, ya sea al originarse o poco después de haberse originado. Tal y como se muestra en la Figura 3.2, un rociador tiene una bombilla de cristal, que contiene un líquido volátil que sella la boquilla del agua. Al provocarse un incendio, el líquido caliente se expande, rompiendo la bombilla de cristal y activando el cabezal del rociador.

Los rociadores contribuyen a la seguridad estructural contra incendios y a la protección de los bienes del edificio. En algunos países, el uso de rociadores en un edificio de varias plantas puede tener como consecuencia una reducción del período de resistencia requerido, pero este aspecto debería consultarse con las normativas nacionales pertinentes.



Figura 3.2 El rociador y su activación

3.2 Protección pasiva contra incendios

Las altas temperaturas que se alcanzan en un edificio cuando se declara un incendio afectan a todos los materiales de construcción, de tal manera que su resistencia y rigidez se ven reducidas a medida que la temperatura aumenta. En ocasiones es preciso proporcionar protección contra el fuego a los elementos estructurales en edificios de varias plantas con el fin de retrasar la pérdida de capacidad portante de carga. Los elementos estructurales pueden aislarse mediante el uso de materiales de protección, tales como paneles, sprays y recubrimientos intumescentes. El rendimiento de estos materiales de protección contra el fuego se ensaya y evalúa de conformidad con la norma EN 13381^[5].

El espesor de protección requerido dependerá del material de protección seleccionado, el período de resistencia al fuego requerido por las normativas nacionales sobre edificios, el factor de forma del elemento que se pretende proteger y la temperatura crítica del elemento.

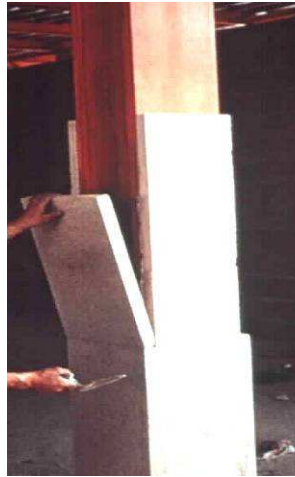
3.2.1 Métodos y materiales de protección contra incendios

Existen dos tipos de materiales de protección pasiva: reactivos y no reactivos. Los materiales de protección no reactivos conservan sus propiedades cuando se ven expuestos al fuego. Los paneles y los sprays son los materiales no reactivos más habituales. Los materiales de protección reactivos se caracterizan por un cambio en sus propiedades cuando se ven expuestos al fuego. El ejemplo más conocido de este tipo de protección es la pintura intumescente.

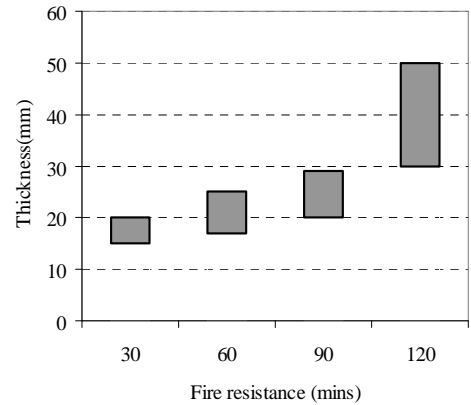
Paneles

Se utiliza una amplia gama de paneles comerciales, cuyo espesor va de 15 a 50 mm, para proteger los elementos de acero y hacer que alcancen una resistencia al fuego de entre 30 y 120 minutos.

Los paneles suelen estar fabricados a partir de fibras minerales o materiales que de forma natural son laminares, tales como la vermiculita y la mica, junto con aglutinantes de hormigón y/o silicato. Los paneles pueden fijarse a los elementos de acero bien mecánicamente, a través de tornillos, abrazaderas y/o angulares galvanizados, o también se pueden pegar y fijar mediante clavos.



(a)



(b)

Figura 3.3 Protección contra el fuego mediante paneles (a) Fijación de paneles al perfil de acero; (b) Resistencia al fuego

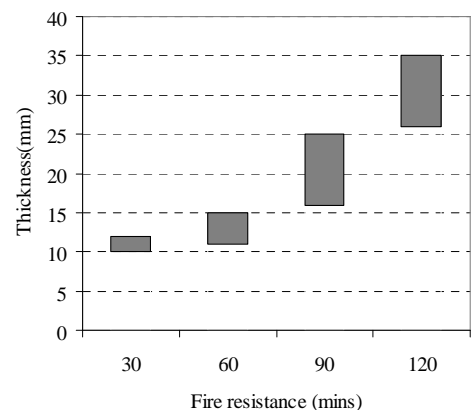
Los paneles se entregan terminados en fábrica y, por lo tanto, su espesor y calidad, por lo general, están garantizados. Presentan un aspecto limpio y vienen empaquetados, pudiendo estar pre-acabados o listos para pintar. Sin embargo, los paneles no pueden fijarse con facilidad en elementos de formas complejas. En términos generales, los paneles son más caros que las pinturas intumescentes o que los sprays, siendo más baratos los que requieren ser pintados tras su instalación que los que vienen con el acabado. Además, el tiempo necesario para instalar los paneles es importante en comparación con las pinturas intumescentes, lo cual aumenta los gastos de construcción y afecta al programa de construcción de los edificios de varias plantas.

Sprays no reactivos

La aplicación de este tipo de protección se describe en la Figura 3.4(a). Espesores de 10 a 35 mm de sprays no reactivos proporcionan una resistencia al fuego de entre 30 y 120 minutos, tal y como se indica en la Figura 3.4(b).



(a) Aplicación



(b) Resistencia al fuego para un espesor determinado

Figura 3.4 Spray no reactivo contra el fuego (a) Aplicación (b) Resistencia al fuego

Los sprays no reactivos consisten básicamente en materiales de hormigón o de yeso que contienen fibra mineral, vermiculita expandida y/o otros agregados o materiales de relleno ligeros. Este tipo de protección se aplica *in situ* y es especialmente adecuada para aquellos elementos que presentan perfiles complejos o que no serán visibles cuando el edificio esté en uso. Sin embargo, pulverizarla *in situ* puede afectar de manera importante al programa de construcción.

Pinturas intumescentes

Al contrario de lo que ocurre con los paneles no reactivos y con los sprays, las pinturas intumescentes reaccionan con el fuego y cambian sus propiedades de mera pintura decorativa en un primer momento para convertirse en una capa carbonosa intumescente, al aumentar unas 50 veces su espesor original. Los espesores iniciales de entre 0,25 y 2,5 mm pueden proporcionar una resistencia al fuego de entre 30 y 120 minutos, tal y como se indica en la Figura 3.5.

Las pinturas intumescentes tienen la misma apariencia que las pinturas convencionales y pueden ser pinturas al agua o acrílicas. Están compuestas por tres capas que incluyen una imprimación compatible, el recubrimiento intumescente y un recubrimiento superior o recubrimiento sellador (que suele estar disponible en una amplia gama de colores). En la actualidad, la mayor parte de las pinturas intumescentes se aplican en taller para facilitar el programa de construcción.

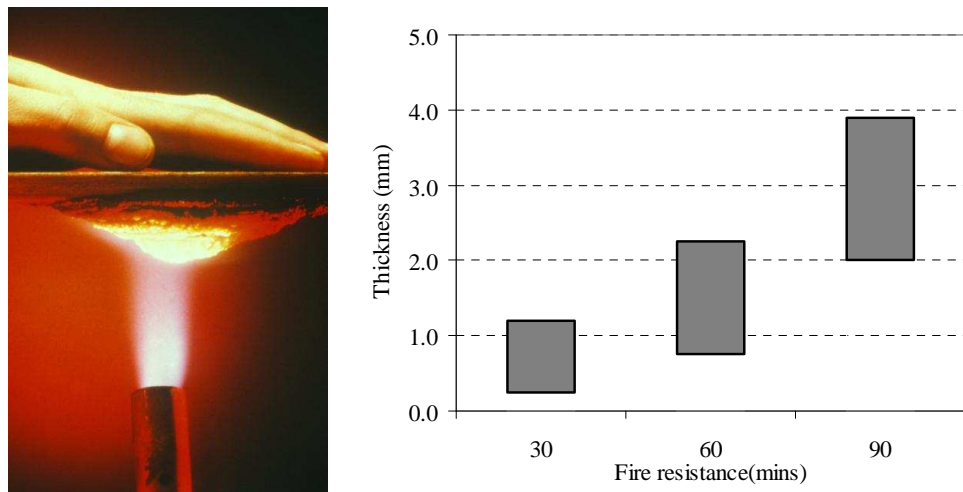


Figura 3.5 Pintura intumescente

También se utilizan pinturas intumescentes en aplicaciones externas y patrimoniales, en las que el aspecto del edificio debe mantenerse.

3.2.2 Espesor de los materiales de protección contra el fuego

Para un producto determinado, el espesor de la protección contra el fuego varía en función de la resistencia al fuego requerida y del factor de forma de los elementos de acero. El factor de forma varía en función de la protección contra el fuego seleccionada y con el tipo y tamaño del elemento de acero. En la Figura 3.6 se dan expresiones para calcular el factor de forma a partir de la

configuración de la protección contra el fuego y de las propiedades geométricas de la sección.

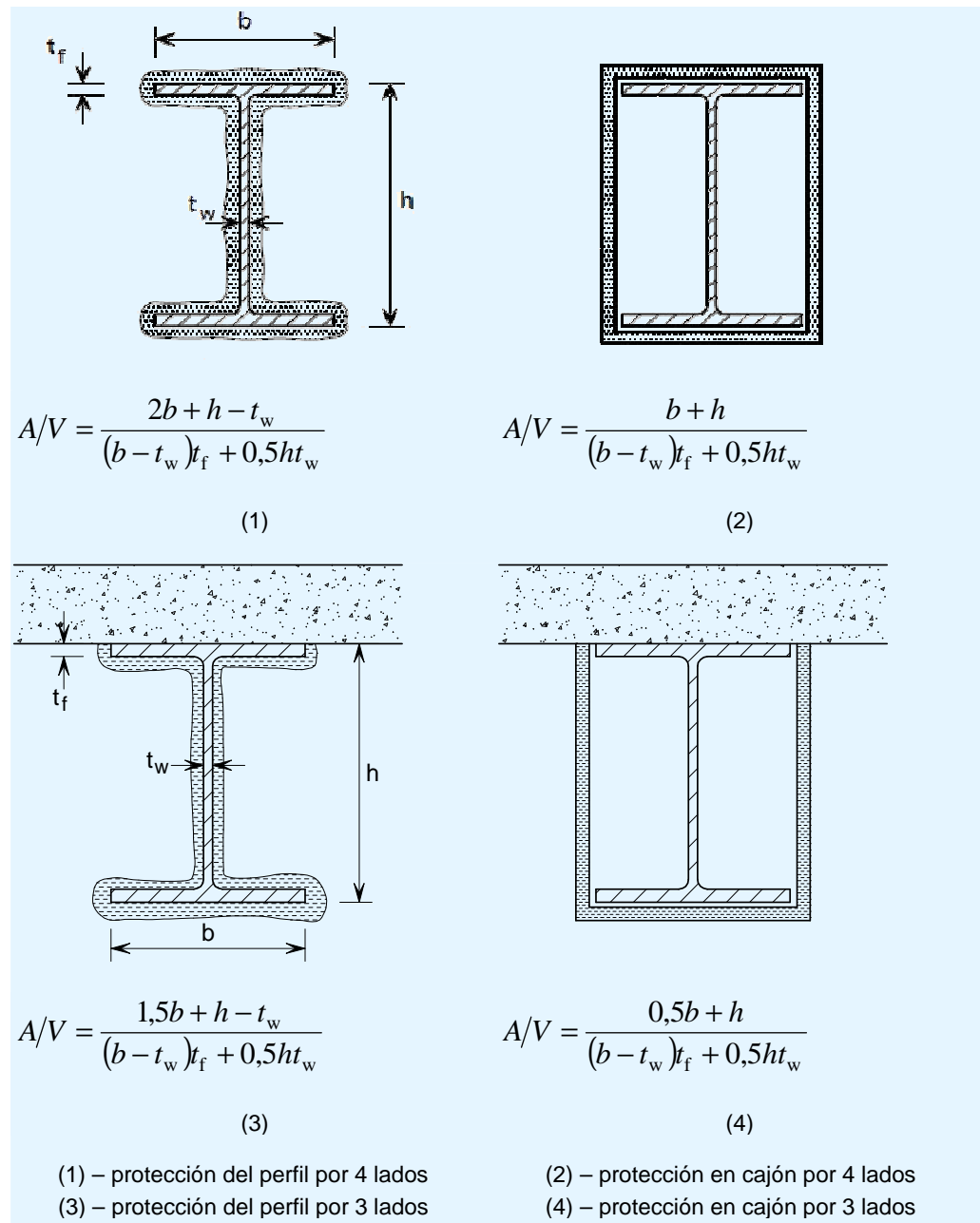


Figura 3.6 Configuración de protecciones y factor de forma

El período de resistencia al fuego requerido viene determinado por las normativas nacionales sobre edificios en cada país. Siguiendo las tablas de datos, como la que se muestra en la Tabla 3.1 para la protección de paneles, en la Tabla 3.2 para el recubrimiento no reactivo pulverizado y en la Tabla 3.3 para el recubrimiento intumescente, el espesor de los materiales de protección resulta fácil de definir.

Normalmente las tablas de datos las publican los fabricantes. En algunos países dichas tablas se han consolidado como documentos de referencia, y son publicadas por los organismos pertinentes y aceptadas por los diseñadores.

Tabla 3.1 Ejemplo – tabla de espesores para paneles de protección contra el fuego

Espesor de los paneles de protección (mm)	Factor de forma máximo A_m/V (m^{-1}) para vigas y pilares			
	R30	R60	R90	R120
20	260	260	125	70
25			198	110
30			260	168
35				232
40				256
45				260

Tabla 3.2 Ejemplo – tabla de espesores para spray no reactivo

Factor de forma A_m/V (m^{-1})	Espesor requerido (mm) del recubrimiento no reactivo pulverizado			
	R30	R60	R90	R120
40	10	10	11	15
80	10	12	16	21
120	10	14	19	24
160	10	15	21	26
200	10	16	22	28
240	10	16	23	29
280	10	17	23	30

Tabla 3.3 Ejemplo – tabla de espesores para pinturas intumescentes, R60

Factor de forma A_m/V (m^{-1})	Viga en I – 3 lados	Viga en I – 4 lados	Pilar en I – 4 lados
40	0,25	0,26	0,26
80	0,31	0,39	0,39
120	0,39	0,53	0,53
160	0,48	0,66	0,66
200	0,69	0,83	0,83
240	0,90	1,00	1,00
280	1,08	1,74	1,74

3.3 Construcción resistente al fuego

Como reconocimiento de la importancia de la resistencia estructural al fuego y los gastos asociados a los materiales de protección pasiva contra el fuego, se han desarrollado algunos sistemas estructurales alternativos que se sirven de su resistencia inherente al fuego y evitan así la necesidad de poner en práctica una protección contra el fuego específica. Estos sistemas incluyen forjados colaborantes, vigas integradas y estructuras de acero encapsuladas.

3.3.1 Forjados mixtos

Las losas de hormigón prefabricado tienen una resistencia inherente al fuego de hasta 120 minutos, si se hace una provisión adecuada y detallada de las barras de armadura. Sin embargo, las losas suelen estar apoyadas sobre el ala superior

de una viga colgada (véase la Figura 3.7(a)), que tiene tres lados expuestos y requiere protección contra el fuego.

Como alternativa a los forjados de hormigón prefabricados, los forjados mixtos, Figura 3.7(b), son habituales en los edificios de varias plantas.

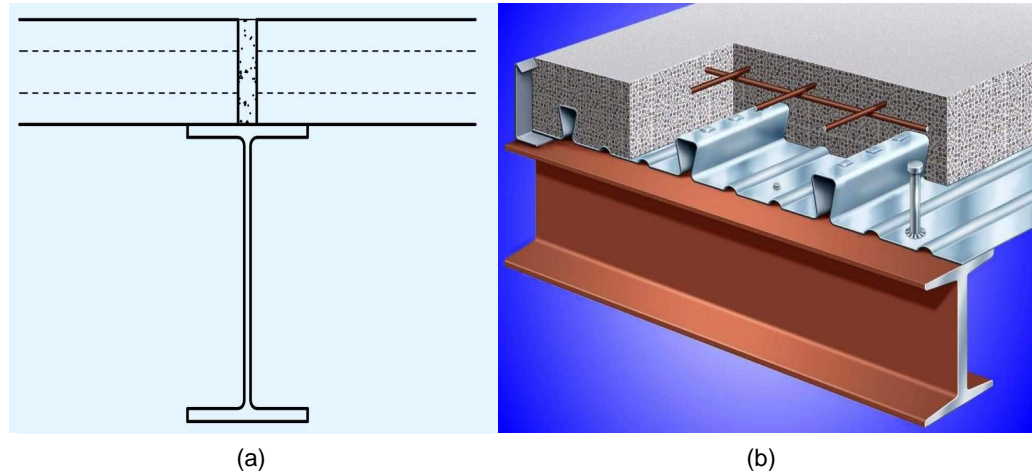
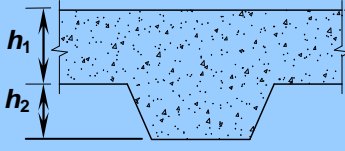
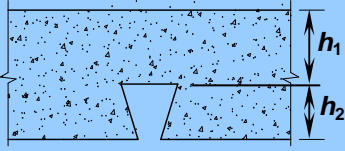


Figura 3.7 (a) Forjado de hormigón prefabricado con viga colgada; (b) Forjado mixto con chapa colaborante

Los forjados mixtos están contruidos mediante una chapa de acero de perfil trapezoidal o en cola de milano al que se adhiere el hormigón de la parte superior. En un forjado mixto, el hormigón está reforzado con fibras o con armaduras de acero para controlar las grietas ocasionadas por la tracción debida a la flexión en el soporte del forjado así como por la contracción y el asentamiento del hormigón. Además de controlar las grietas, las armaduras también proporcionan al forjado una resistencia a la flexión en la zona de los soportes en situación de incendio.

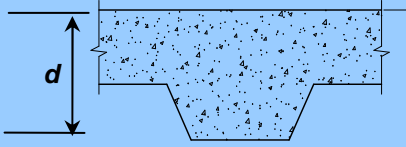
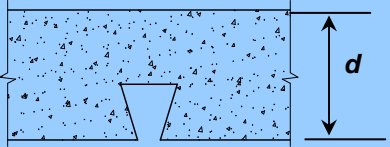
En los forjados mixtos con la superficie inferior expuesta, el criterio de aislamiento normalmente se logra proporcionando suficiente profundidad de hormigón, de manera que éste proteja las armaduras durante el período requerido, véase la Tabla 3.4. Cuanto mayor sea el requerimiento de resistencia al fuego, mayor será el espesor que deberá tener el hormigón. El criterio de integridad suele cumplirse si se utiliza una chapa colaborante continua.

Tabla 3.4 Valores típicos del mínimo espesor de hormigón h_1 (mm), en forjados mixtos

Resistencia al fuego requerida (minutos)	Cobertura de acero trapezoidal		Cubierta de acero entrante	
				
	Hormigón normal	Hormigón ligero	Hormigón normal	Hormigón ligero
60	70	60	90	90
90	80	70	110	105
120	90	80	125	115

La Tabla 3.5 muestra las profundidades y luces habituales de los forjados mixtos con hormigón normal y una carga uniforme de 5,0 kN/mm².

Tabla 3.5 Profundidades y luces típicas para forjados mixtos

Resistencia al fuego requerida (minutos)	Cobertura de acero trapezoidal				Cubierta de acero en cola de milano			
								
	Un único vano		Vano doble		Un único vano		Vano doble	
	Profundidad (mm)	Luz (m)	Profundidad (mm)	Luz (m)	Profundidad (mm)	Luz (m)	Profundidad (mm)	Luz (m)
60	140	3,8	140	4,2	101	3,0	101	3,4
90	150	3,1	150	3,3	105	2,9	105	3,3
120	160	3,1	160	3,4	115	2,4	115	2,9

3.3.2 Vigas integradas

Las vigas integradas son una parte de un sistema de forjados en el que las vigas de acero están integradas en el canto de una losa de hormigón *in situ* o prefabricada, en lugar de que la losa vaya apoyarla sobre las alas superiores de las vigas. Por ello, el canto total del forjado se minimiza. Toda la sección de acero, a excepción del ala o placa inferior, está aislada del fuego por el hormigón que la rodea.

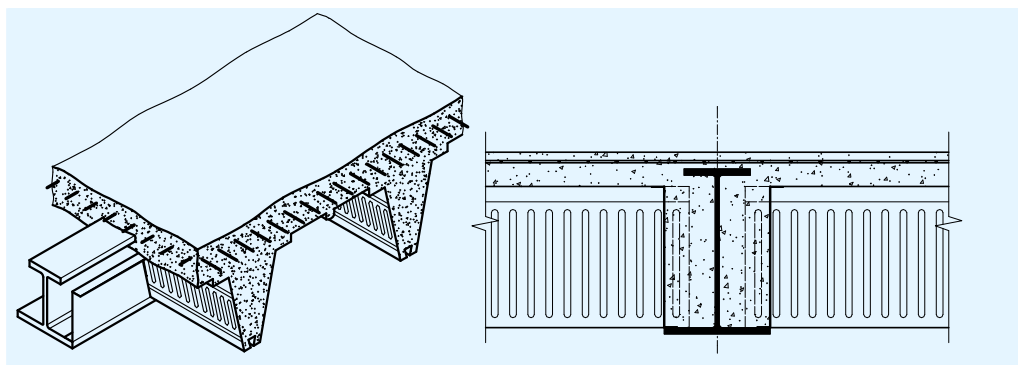


Figura 3.8 ASB – Viga integrada (viga de acero asimétrica laminada)

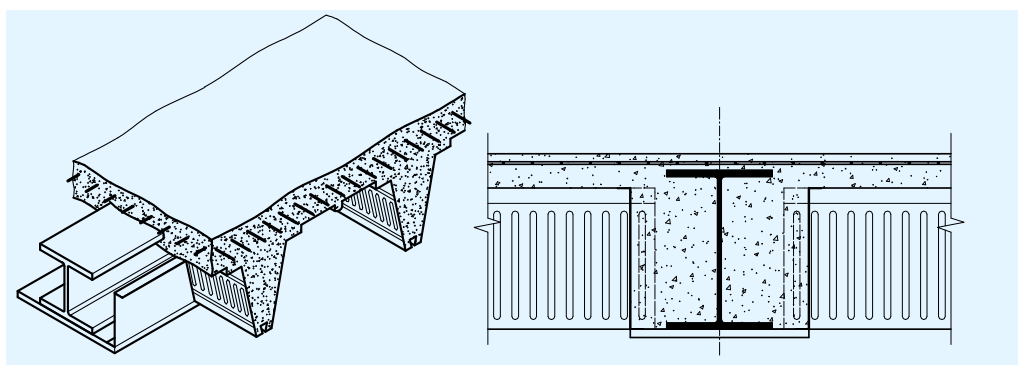


Figura 3.9 IFB – Viga integrada (sección en I con una placa soldada a su ala inferior)

Existen dos tipos de vigas integradas con sección en I: vigas de acero asimétricas (ASB, Figura 3.8) y vigas integradas fabricadas (IFB, Figura 3.9).

Por lo general, las vigas integradas pueden alcanzar hasta 60 minutos de resistencia al fuego sin protección. Si se incluye armadura longitudinal adicional, se puede alcanzar una resistencia al fuego de 90 minutos, incluso sin protección en el ala inferior. Los cantos totales y las luces habituales de los forjados con vigas integradas se resumen en la Tabla 3.6, a la que se puede recurrir durante la fase preliminar del proyecto de edificios de varias plantas.

Tabla 3.6 Canto de forjado y luz típica para vigas integradas

Tipo de forjado	Profundidad (mm)	Vano (m)
Viga integrada ASB	280 a 400	6 a 9
Viga integrada IFB	250 a 450	6 a 9

3.3.3 Vigas y pilares parcialmente embebidos

Las vigas y los pilares parcialmente embebidos se construyen rellinando el espacio entre las alas de las secciones en I con hormigón en masa o armado, tal y como se muestra en la Figura 3.10 y Figura 3.11.

En comparación con las secciones en I sin proteger, que tienen una resistencia al fuego de aproximadamente 15 minutos, las secciones parcialmente embebidas pueden alcanzar más de 60 minutos, que normalmente satisface los requisitos de resistencia al fuego de los edificios de varias plantas. El aumento del período de resistencia al fuego se debe a la cobertura de la mayor parte de

la superficie de la estructura de acero mediante hormigón, que tiene una conductividad térmica baja. También es posible alcanzar períodos de resistencia al fuego mayores aumentando la cantidad de armadura embebida en el hormigón, para compensar la pérdida de resistencia de la estructura de acero expuesta al fuego.

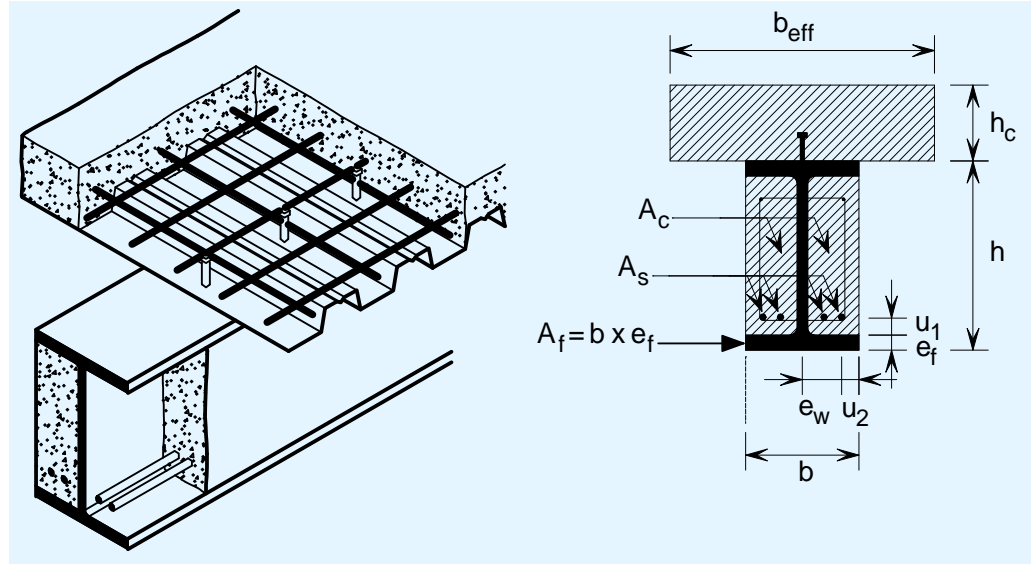


Figura 3.10 Viga parcialmente embebida

La norma EN 1994-1-2 ofrece reglas relativamente sencillas y tablas validadas en las cláusulas §4.2.2 y §4.2.3 correspondientes al cálculo ante incendios de las vigas y pilares mixtos, incluidas las secciones de acero parcialmente embebidas. Estos métodos relacionan la resistencia al fuego de los elementos mixtos con su nivel de carga (el nivel de carga se expresa como $\eta_{fi,t}$ y se describe en las secciones 4.4.2 y 4.4.3 de esta guía), la relación h/b el tipo de elemento y al área de la armadura A_s .

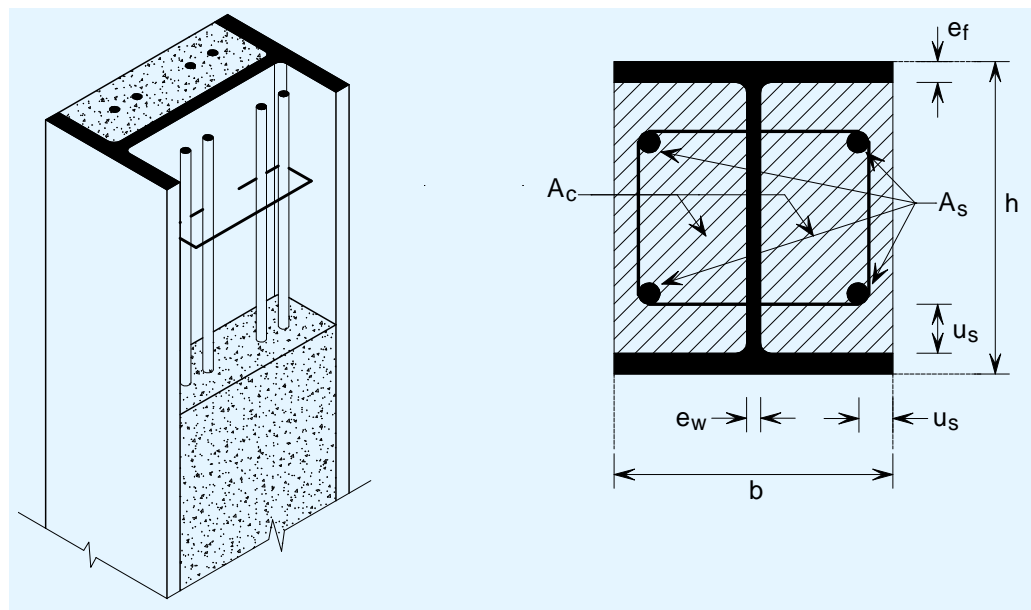


Figura 3.11 Viga parcialmente embebida

Por lo general, un aumento de la resistencia al fuego o del nivel de carga requerirá secciones transversales mayores y armadura adicional en las secciones parcialmente embebidas. Las tablas pueden utilizarse para determinar las dimensiones mínimas de la sección transversal (como el ancho de sección b_{\min}) y el área de la armadura $A_{s,\min}$ de secciones parcialmente embebidas, para conseguir el periodo de resistencia al fuego requerido.

La Tabla 3.7 muestra datos extraídos de la norma EN 1994-1-2 para el cálculo ante incendios de secciones parcialmente embebidas. Cuando se utilizan estas tablas, el nivel de la carga $\eta_{fi,t}$ puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$R_{fi,d,t} = \eta_{fi,t} \cdot R_d$$

donde:

$R_{fi,d,t}$ es la resistencia de cálculo del elemento en situación de incendio para el instante, t

R_d es la resistencia de cálculo del elemento a temperatura normal.

Para calcular el nivel de carga la norma EN 1994-1-2 recomienda que la resistencia de cálculo para el diseño a temperatura normal, R_d , se calcule para una longitud de pandeo de dos veces la longitud de pandeo utilizada para el cálculo a fuego.

Tabla 3.7 Tabla típica para cálculo a fuego de perfiles parcialmente embebidos

Elemento	Relación sección h/b	Nivel de carga	Relación ancho b_{\min} (mm)/cuantía geométrica (%) para el periodo de resistencia al fuego requerido				
			R30	R60	R90	R120	R180
Viga	>1,5	$\eta_{fi,t} \leq 0,5$	80/0,0	150/0,0	200/0,2	240/0,3	300/0,5
		$\eta_{fi,t} \leq 0,7$	80/0,0	240/0,3	270/0,4	300/0,6	
	>3,0	$\eta_{fi,t} \leq 0,5$	60/0,0	100/0,0	170/0,2	200/0,3	250/0,3
		$\eta_{fi,t} \leq 0,7$	70/0,0	170/0,2	190/0,4	270/0,5	300/0,8
Pilar	h y b mínimos	$\eta_{fi,t} \leq 0,47$	160/-	300/4,0	400/4,0		
		$\eta_{fi,t} \leq 0,66$	160/1,0	400/4,0			

A modo de ejemplo, considérese el caso de una viga parcialmente embebida con una relación $h/b > 3$ y una carga moderada ($\eta_{fi,t} \leq 0,5$).

Para un período de resistencia al fuego de 60 minutos (R60):

La anchura no debería ser inferior a 100 mm, por lo tanto $h > 3b = 300$ mm, por lo que la superficie transversal de la sección es de 100×300 mm.

No se precisa armadura, $A_s = 0$.

Para un período de resistencia al fuego de 120 minutos (R120):

La anchura no debería ser inferior a 200 mm, por lo tanto $h > 3b = 600$ mm, por lo que la superficie transversal de la sección es de 200×600 mm.

La cuantía de la armadura, A_s , no debe ser inferior a 0,3% del área de hormigón embebido A_c , es decir $A_s \geq 0,003A_c$.

3.3.4 Estructuras de acero externas

En algunos casos, los principales elementos estructurales, tales como pilares y vigas, pueden estar ubicados en el exterior del cerramiento del edificio sin ningún tipo de protección contra el fuego, como en los ejemplos de la Figura 3.12. Los requisitos de protección contra el fuego para estructuras de acero externas son sensiblemente inferiores, ya que su temperatura es inferior, si se compara con los elementos en un recinto cerrado.

Para mayor información sobre el cálculo ante incendios de estructuras de acero externas, se puede consultar la norma EN 1993-1-2, §4.2.5.4.

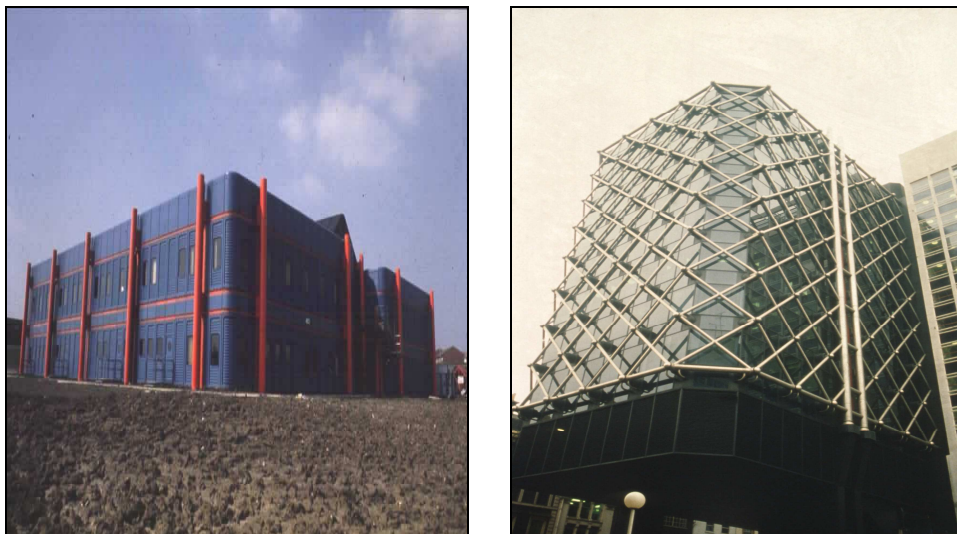


Figura 3.12 Utilización de acero externo

3.3.5 Soluciones combinadas para la resistencia al fuego

Si se seleccionan las soluciones estructurales de manera cuidadosa, se puede conseguir una resistencia al fuego de hasta 60 minutos para edificios de varias plantas sin necesidad de aplicar materiales de protección contra el fuego. Por lo general, se tendrán que utilizar vigas integradas y pilares parcialmente embebidos o rellenos de hormigón. En la Tabla 3.8 se muestra el período de resistencia al fuego que puede conseguirse en una estructura si se combinan las vigas y pilares como se acaba de indicar. Esta tabla considera la resistencia al fuego de los elementos individuales. Se pueden obtener resultados menos conservadores basando el cálculo a fuego en el conjunto de elementos estructurales mediante métodos como FRACOF (véase la sección 5.2).

Tabla 3.8 Solución combinada para una estructura de acero con o sin protección ante incendios

	Viga sin proteger	Viga externa	Viga integrada	Viga embebida	Viga protegida
Período de resistencia al fuego (min)					
Pilar de acero sin protección	15	15	15	15	15
Pilar externo	15	>30	>30	>30	>30
Pilar embebido	15	>30	>60	>60	>60
Pilar protegido	15	>30	>60	>60	>60

Nota: El período de resistencia al fuego indicado es el más bajo de la combinación de viga y pilar correspondientes en cada caso.

4 MODELOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS

En las secciones anteriores se ha mostrado que el enfoque prescriptivo al cálculo ante incendios mediante el uso de tablas resulta en una solución segura. Sin embargo, no siempre proporciona la solución más eficiente. Mediante el uso de los modelos de cálculo simplificados descritos en los Eurocódigos, se puede demostrar que en algunos, o en la totalidad, de los elementos estructurales se precisa menos protección, o ninguna, lo que redundaría en una solución más económica.

Existen dos enfoques a estos cálculos simplificados: el enfoque de la temperatura crítica y el enfoque de la capacidad portante. A partir de estos métodos, el diseñador, de manera razonable, puede decidir si es preciso o no utilizar protección ante incendios.

Estos métodos, sin embargo, se basan en elementos individuales sometidos a una exposición al fuego estándar, en lugar de una estructura completa en un fuego natural. Por lo tanto, al contrario de lo que ocurre en el análisis basado en prestaciones (véase la sección 6), no tienen en cuenta el comportamiento real del elemento estructural en un incendio real.

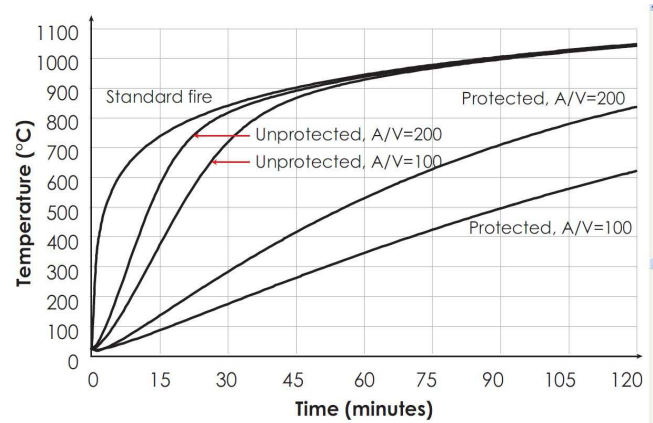
Con el fin de facilitar la comprensión del razonamiento subyacente en los métodos simplificados del Eurocódigo y que se describen en las secciones 4.4.2 y 4.4.3 de esta guía, en la sección 4.1 se proporciona una introducción a los efectos térmicos del fuego.

4.1 Comportamiento del fuego y acciones térmicas

4.1.1 Acción de fuego y fuego estándar

El fuego es un fenómeno extremadamente complejo en el que se dan distintos tipos de reacciones químicas. El fuego libera energía calórica en forma de llamas y humo dentro del edificio, tal y como se muestra en la Figura 4.1(a).

Cuando se declara un incendio, la temperatura del gas dentro de la sección del edificio aumenta rápidamente. A la hora de realizar el cálculo ante incendios, la acción del fuego se representa mediante una curva estándar temperatura-tiempo, tal y como se define en la norma EN 1991-1-2. Esta curva se denomina "fuego estándar" y está representada en la Figura 4.1(b).



(a) Fuego (ensayo de Cardington)

(b) Curva del fuego estándar y aumento de la temperatura de los elementos

Figura 4.1 Acción del fuego

El aumento de la temperatura de un elemento en un incendio está gobernada principalmente por los mecanismos de radiación y convección, a través de un complejo proceso de difusión. Depende de las propiedades térmicas de los materiales y del espesor de la capa protectora, en caso de que esté protegido contra el fuego.

Debido al aumento rápido de la temperatura del gas, la energía calórica del fuego (es decir, la acción térmica) se transfiere al elemento a través de las superficies expuestas, y hace que éste se caliente. Como resultado de ello, la temperatura del elemento aumenta, normalmente en la forma indicada en las curvas que se muestran en la 4.1(b), dependiendo de si los elementos están protegidos o sin proteger.

4.1.2 Modelización del comportamiento del fuego

Como acción térmica sobre las estructuras de los edificios, los incendios pueden ser fuegos localizados o fuegos totalmente desarrollados.

Fuego localizado

Un fuego localizado se encuentra en la fase anterior al flashover y se da únicamente en una parte del sector de incendio. Es improbable que un fuego localizado se propague al resto del sector y que origine una flashover, debido a su lenta propagación y a la baja temperatura que genera. Un fuego localizado se suele modelizar mediante modelos de penacho, modelos de zonas o modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Modelo de penacho

El Anexo C de la norma EN 1991-1-2 describe el denominado modelo de penacho para determinar la acción térmica de un fuego localizado. Si la llama permanece por debajo del techo, tal y como se indica en la Figura 4.2(a), el modelo se utiliza para calcular la temperatura correspondiente en su eje vertical. Sin embargo, si la llama alcanza el techo, como se muestra en la Figura 4.2(b), entonces el modelo determina el flujo de calor a la altura del techo en función de la longitud horizontal de la llama, L_h .

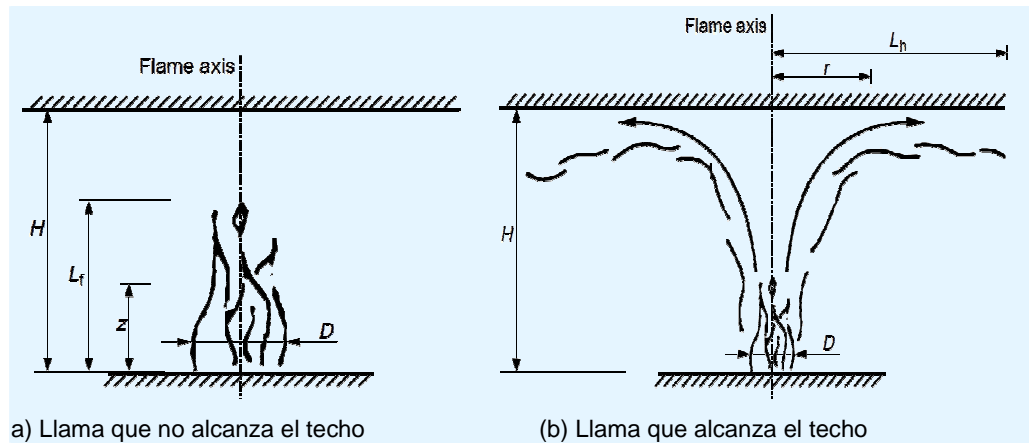


Figura 4.2 Modelo de penacho para fuego localizado en la norma EN 1991-1-2

4.1.3 Fuego totalmente desarrollado

Un fuego está totalmente desarrollado cuando todos los combustibles que existen en un sector están ardiendo a la vez y liberan el calor máximo. Un fuego totalmente desarrollado se suele modelizar mediante fuegos estándar o paramétricos, tal y como se muestra en la Figura 4.3. La severidad de un fuego totalmente desarrollado depende de las condiciones de ventilación y de la cantidad y naturaleza del combustible que haya en el sector.

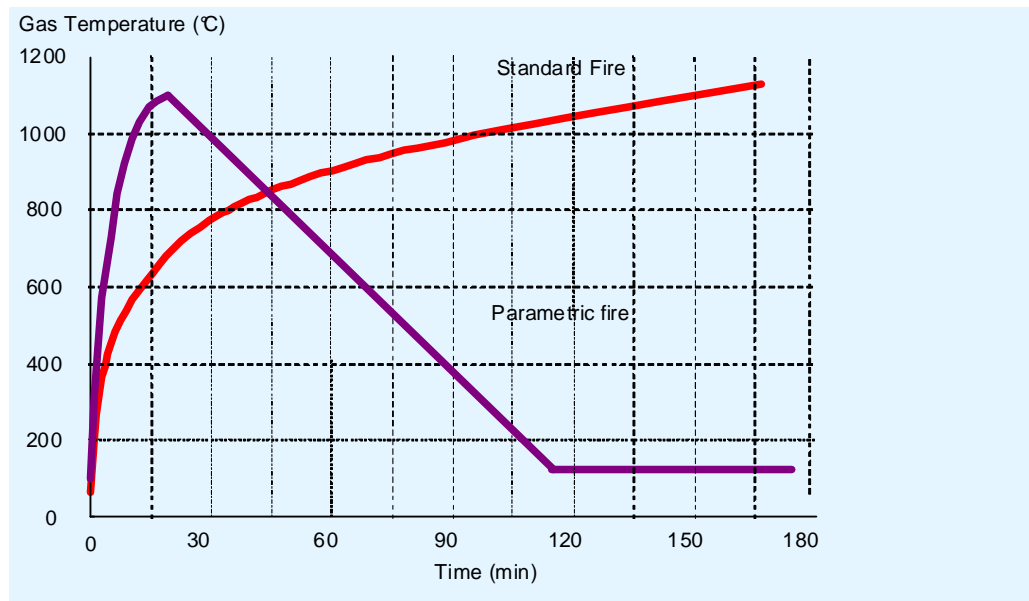


Figura 4.3 Modelo de fuego totalmente desarrollado

4.1.4 Curva nominal temperatura-tiempo

Curva normalizada

En la norma EN 1991-1-2, §3.2 se emplea la curva normalizada temperatura-tiempo para representar la acción térmica de un fuego totalmente desarrollado. Este fuego normalizado sirve para clasificar el comportamiento de los materiales estructurales o de los elementos en hornos de ensayo. Constituye los fundamentos sobre los que se evalúan el tiempo de resistencia al fuego y la función portante de carga de los elementos estructurales, mediante los modelos de cálculo simplificados de las normas EN 1993-1-2 y EN 1994-1-2. También

se emplea para el análisis basado en prestaciones para el cálculo ante incendios de una estructura completa.

4.1.5 Modelo de fuego natural

Fuego paramétrico

El Anexo A de la EN 1991-1-2 define una curva paramétrica temperatura-tiempo para sectores de incendio con una superficie de hasta 500 m². Este fuego paramétrico está compuesto por una fase de calentamiento, otra de enfriamiento y otra residual. La fase de calentamiento suele representarse mediante una curva exponencial hasta la temperatura máxima. La fase de enfriamiento se describe mediante un descenso lineal de la temperatura hasta que llega la fase residual. En un fuego paramétrico la fase de calentamiento depende de las condiciones de ventilación y de las propiedades térmicas de la envolvente del sector de incendio. La duración del calentamiento y la temperatura máxima dependen de la densidad de la carga de fuego y de las condiciones de ventilación. La fase de enfriamiento depende de la duración del calentamiento y de la temperatura máxima que se ha alcanzado.

Hasta cierto punto, el curva paramétrica representa las características de un fuego natural. Sin embargo, su exactitud a la hora de calcular la respuesta térmica del fuego depende de la exactitud de los datos que se introduzcan, tales como la carga de fuego, las condiciones de ventilación, el tamaño del sector y las propiedades térmicas de la envolvente.

4.2 Transferencia de calor

En esta sección se explica la acción del fuego y la evolución de la temperatura en los elementos estructurales cuando se ven expuestos a un fuego normalizado y se hace hincapié en los conceptos de fuego normalizado y factor de forma.

Factor de forma A_m/V

La relación A_m/V del elemento, comúnmente conocido como factor de forma, es un parámetro importante en la velocidad a la que la temperatura de dicho elemento aumenta. El factor de forma se define como la relación entre la superficie expuesta de un elemento y su volumen por longitud de unidad.

La influencia del factor de forma se indica en la Figura 4.1(b), tanto para elementos protegidos como para elementos sin proteger. Cuanto mayor sea el factor de forma, más rápidamente se calentará el elemento. Por ejemplo, después de haber estado expuesto al fuego durante 15 minutos, la temperatura de un elemento sin proteger con un factor de forma de $A_m/V = 200$ aumenta hasta aproximadamente 580°C, mientras que la de un elemento sin proteger con un factor de forma $A_m/V = 100$ sólo alcanza los 380°C.

Esta diferencia se debe al hecho de que un valor alto en el factor de forma representa una superficie grande expuesta, comparada a su volumen y, por lo tanto, el elemento recibe más calor que aquel que posea un factor de forma menor, que representa una superficie expuesta pequeña. Esto se ejemplifica en la Figura 4.4.

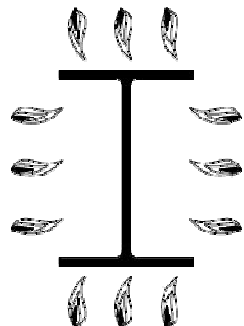
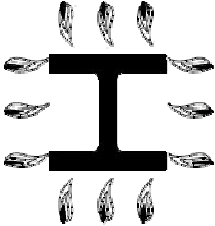
Section Factor = A_m/V where: A_m is the exposed surface area of the member per unit length; V is the volume of the member per unit length.			
	High A_m Low V leading to Fast Heating		Low A_m High V leading to Slow heating

Figura 4.4 Definición del factor de forma A_m/V de un elemento a fuego

Temperatura del elemento en el instante t

La temperatura $\theta_{a,t}$ del elemento en el instante t puede calcularse mediante los modelos simplificados indicados en el apartado §4.2.5 de la norma EN 1993-1-2 o en el apartado §4.3.4.2 de la norma EN 1994-1-2.

Si la temperatura crítica sobrepasa la temperatura de cálculo, es decir si $\theta_{cr} > \theta_{a,t}$, entonces la resistencia al fuego del elemento sin proteger resulta adecuada para esa duración.

Si el elemento sin proteger no es adecuado, será necesario adoptar algunas medidas que mejoren su resistencia al fuego:

- Seleccionar una sección transversal mayor grande para el elemento de acero.
- Seleccionar un grado de acero superior
- Facilitar la protección ante el fuego necesaria

4.3 Análisis estructural

La Figura 4.5 muestra el comportamiento general de un elemento estructural bajo el efecto del fuego normalizado y de las acciones aplicadas. A medida que la temperatura del gas θ_g aumenta, la temperatura del elemento, $\theta_{a,t}$, aumenta también y su resistencia, $R_{fi,d,t}$, disminuye.

La temperatura crítica θ_{cr} se define como la temperatura a la que un elemento ya no puede soportar los efectos de cálculo de las acciones aplicadas. Los efectos de las acciones sobre un elemento son las fuerzas internas o los momentos inducidos por las acciones. Por ejemplo, el viento que sopla sobre una estructura es una acción (la acción del viento) y las fuerzas internas y los momentos flectores inducidos en un pilar son los efectos.

En una estructura sometida a varias acciones (como el viento, la gravedad), un elemento está sometido al valor de cálculo de un efecto, E_d . Cuando esa

estructura, además de dichas acciones está también sometida al fuego, los efectos sobre el elemento cambian, y se expresan como $E_{fi,d}$.

La temperatura crítica θ_{cr} se define como la temperatura en el momento del fallo, cuando la resistencia de un elemento es igual al efecto que actúa sobre él:

$$R_{fi,d,t} = E_{fi,d}$$

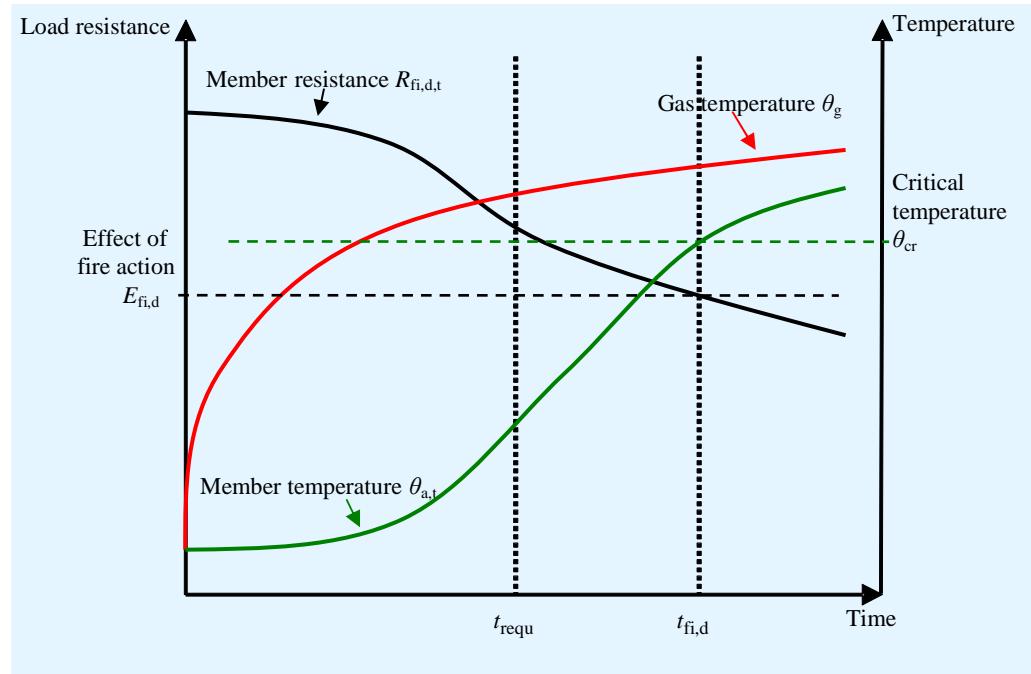


Figura 4.5 Comportamiento de un elemento estructural a fuego

Para cumplir los requisitos de la ingeniería de seguridad contra incendios, el proyectista debe asegurarse de que se cumpla una de las siguientes condiciones:

- En el instante $t_{fi,requ}$ la temperatura del elemento es inferior a la temperatura crítica: $\theta_{cr} \geq \theta_{a,t}$ ó
- En el instante $t_{fi,requ}$ la resistencia del elemento es superior a los efectos de cálculo: $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d}$.

4.4 Métodos simplificados de cálculo estructural contra incendios

4.4.1 Introducción

Los métodos de cálculo simplificados siguen el principio del estado límite último, al igual que los métodos de cálculo a temperatura ambiente. Los requisitos de seguridad ante incendio se cumplen cuando se proporciona un cálculo que cumpla las condiciones anteriores.

Los modelos de cálculo simplificados tienen en cuenta de la reducción de los efectos de las acciones en caso de incendio y la variación de las propiedades de los materiales a temperaturas elevadas. Los modelos de cálculo simplificados tienen una aplicación más amplia que el enfoque prescriptivo, y pueden aplicarse a:

- Elementos de acero sin proteger, incluidos elementos a tracción, vigas y pilares de acero.
- Elementos mixtos sin proteger, incluidas losas y vigas mixtas, vigas y pilares de hormigón embebidos y pilares tubulares rellenos de hormigón.
- Elementos de acero y mixtos protegidos.

Efecto de cálculo de las acciones, $E_{fi,d}$

La acción del fuego se trata como una acción accidental en las partes de los Eurocódigos que tratan el fuego. Debido a la baja probabilidad de que ocurra un incendio importante a la vez que los valores máximos de todas las acciones externas, el efecto de las acciones para el cálculo ante incendios puede determinarse mediante la reducción de los efectos de cálculo de las acciones externas para el cálculo a temperatura ambiente a través de un coeficiente de reducción η_{fi} :

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d$$

donde:

E_d es el efecto de cálculo de las acciones de cálculo a temperatura ambiente según la norma EN 1990

η_{fi} es el coeficiente de reducción para el valor de cálculo del nivel de carga en situación de incendios, calculado como

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \text{ para la combinación de cargas (6.10) de la norma EN 1990}$$

G_k es el valor característico de la acción permanente

$Q_{k,1}$ es el valor característico de la acción variable predominante

ψ_{fi} es el factor de combinación de valores, obtenido bien de $\psi_{1,1}$ o $\psi_{2,1}$, véase la norma EN 1991-1-2

γ_G es el coeficiente parcial para las acciones permanentes

$\gamma_{Q,1}$ es el coeficiente parcial para la acción variable predominante

La expresión para el cálculo del coeficiente de reducción para las combinaciones de cargas (6.10a) y (6.10b), se debe consultar en la norma EN 1993-1-2, §2.4.2.

4.4.2 Método de temperatura crítica

Los fundamentos de este enfoque consisten en el cálculo de la temperatura del elemento después del período requerido de resistencia al fuego y en compararlo con la temperatura crítica, que es la temperatura a la que el elemento fallaría. Los pasos que deben seguirse para aplicar el enfoque de temperatura crítica se indican en la Figura 4.6.

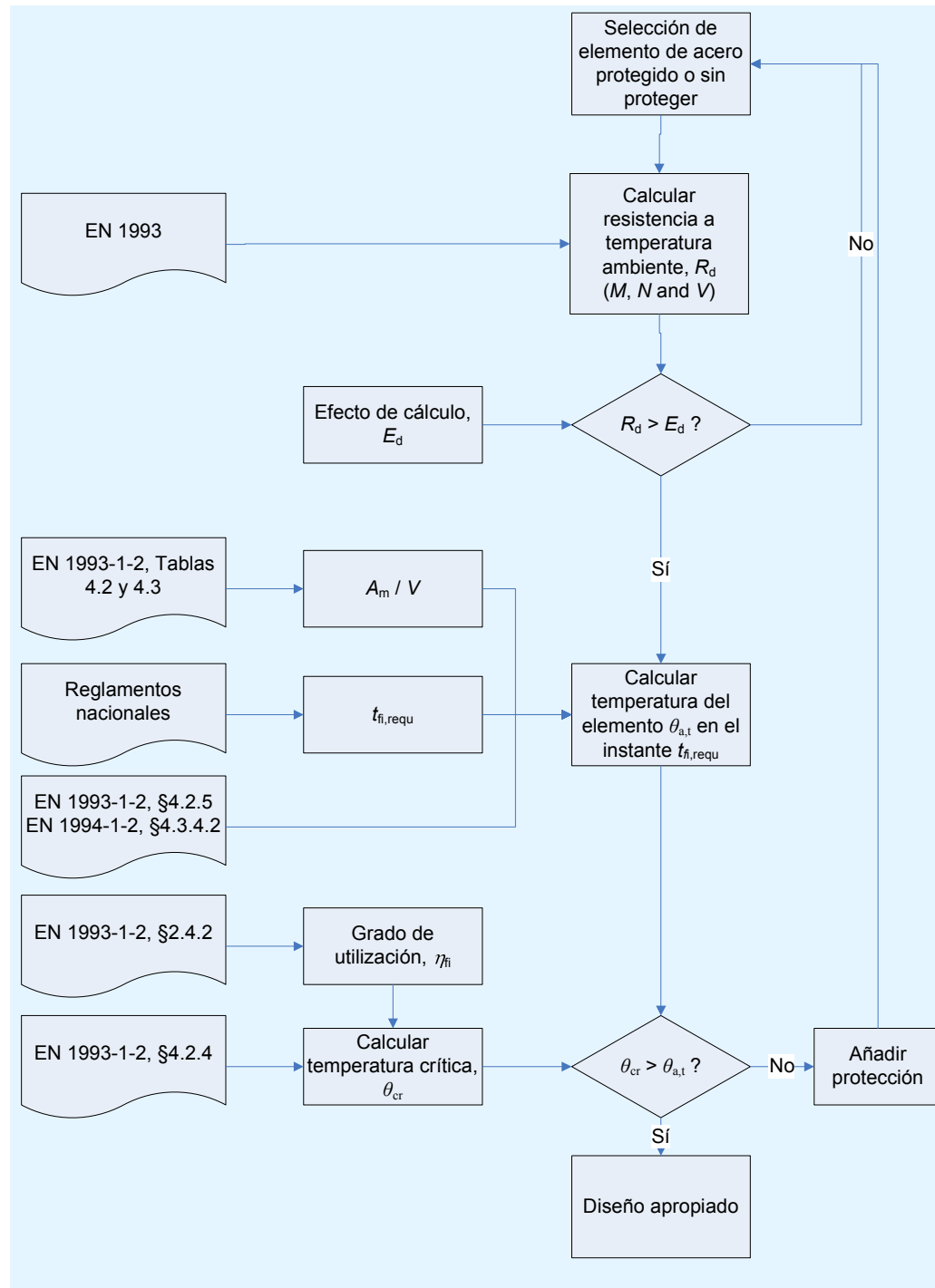


Figura 4.6 Cálculo en situación de incendio para elementos usando el enfoque de la temperatura crítica

Temperatura crítica

El modelo simplificado con el método de la temperatura crítica sólo se puede utilizar para elementos individuales, cuando los criterios de deformación o las consideraciones de estabilidad no deben tenerse en cuenta. Este método está permitido únicamente para elementos a tracción y para vigas con coacciones, pero no para vigas sin coacción y pilares en los que el pandeo sea un modo de fallo potencial.

La temperatura crítica de un elemento de acero no mixto puede calcularse mediante el modelo simplificado que se indica en el apartado §4.2.4 de la norma EN 1993-1-2. La temperatura crítica disminuye a medida que el grado de utilización del elemento, μ_0 , aumenta. El grado de utilización se define como la relación entre el efecto de cálculo de las acciones a temperatura elevada, $E_{fi,d}$, y la resistencia del elemento a temperatura ambiente calculada con coeficientes parciales para situación de incendio, $R_{fi,d,0}$, de manera que:

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0}$$

Para secciones clase 4, se recomienda utilizar una temperatura crítica de 350°C.

La temperatura crítica de los elementos mixtos se indica en el apartado §4.3.4.2.3 de la norma EN 1994-1-2.

4.4.3 Método de la función portante

Los fundamentos de este método consisten en el cálculo de la resistencia del elemento después del período requerido de resistencia al fuego y en su comparación con el efecto de cálculo de las acciones a temperatura elevada, $E_{d,fi}$. Los pasos que deben seguirse para aplicar el método de la función portante se indican en la Figura 4.7.

Clasificación de sección

Al igual que para el cálculo a temperatura ambiente, las secciones transversales se clasifican siguiendo la Tabla 5.2 de la norma EN 1993-1-1.

El coeficiente ε se modifica aplicando un factor de 0,85, para considerar la reducción del límite elástico y del módulo elástico del acero a temperaturas elevadas, como se especifica en el apartado §4.2.2 de la norma EN 1993-1-2. Esta modificación reduce los límites c/t para las distintas clases de sección, de manera que algunas de ellas pueden presentar una clasificación más perjudicial que a temperatura ambiente.

Resistencia a tracción, a cortante y a flexión de los elementos de acero en situación de incendio

Los modelos simplificados para calcular las resistencias de cálculo a tracción, a cortante y a flexión de los elementos de acero en ante un fuego normalizado se indican en los apartados §4.2.3.1, §4.2.3.3 y §4.2.3.4 de la norma EN 1993-1-2.

Estos modelos parten de la premisa de que los elementos poseen una temperatura uniforme y emplean un límite elástico reducido y los coeficientes parciales correspondientes para el cálculo ante incendios.

Sin embargo, en realidad, la temperatura a lo largo y ancho de un elemento dista mucho de ser uniforme, lo cual afecta a su comportamiento mecánico. Por ejemplo, si una viga de acero soporta una losa de hormigón sobre su ala superior, la temperatura en el ala superior es inferior que la temperatura del ala inferior. Por lo tanto, su resistencia última a flexión es en realidad superior a la resistencia que tendría si la sección entera estuviese a la temperatura del ala inferior.

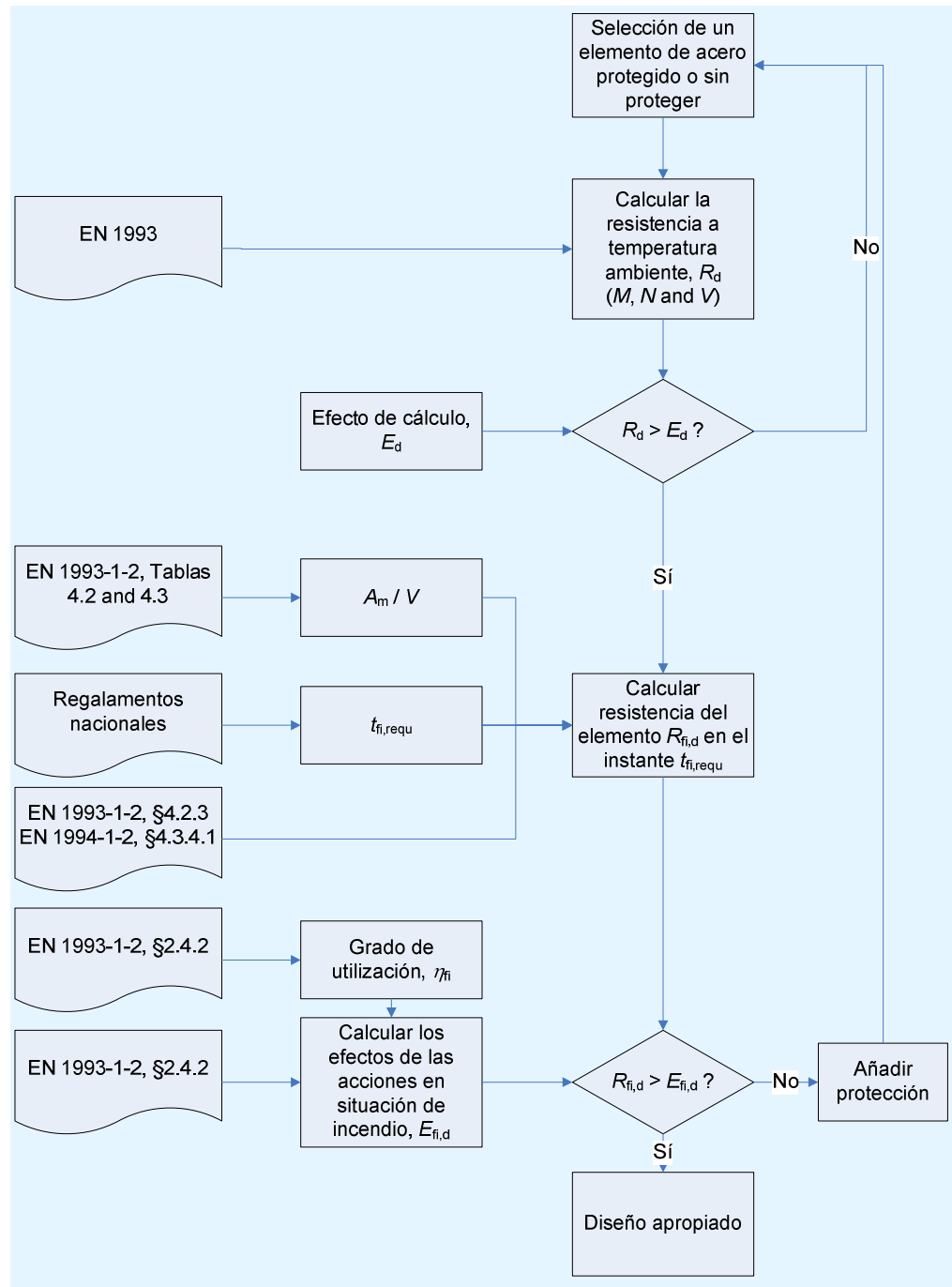


Figura 4.7 Cálculo en situación de incendio para elementos usando el método de la función portante

Las ventajas de un gradiente térmico de este tipo pueden tenerse en cuenta dividiendo la sección transversal en una serie de elementos y asignando un límite elástico reducido a cada elemento en función de su temperatura. La resistencia total de la sección transversal puede calcularse sumando las resistencias de cada elemento. Otra alternativa para tener en cuenta la influencia beneficiosa del gradiente térmico en la resistencia de estos elementos es calcular la misma utilizando dos factores de adaptación empíricos, κ_1 y κ_2 , tal y como se indica en §4.2.3.3 de EN 1993-1-2. Esta alternativa proporciona un valor conservador de la resistencia.

Resistencias de las vigas y pilares sin coacción

Los modelos simplificados para calcular las resistencias de pandeo de las vigas y pilares sin coacciones con una temperatura uniforme pueden encontrarse en los apartados §4.2.3.3, §4.2.3.4 y §4.2.3.2 de la norma EN 1993-1-2. Estas reglas se desarrollaron introduciendo las siguientes modificaciones a los modelos correspondientes de la norma EN 1993-1-1 para el cálculo a temperatura ambiente, para tener en cuenta el efecto de las altas temperaturas:

- Límite elástico reducido para temperaturas elevadas
- Uso de coeficiente parciales para situación de incendio
- Mayor esbeltez no dimensional
- La longitud de pandeo de los pilares en situación de incendio se considera 0,5 y 0,7 de la longitud del sistema para el piso superior y para el resto de los pisos, respectivamente
- Curvas de pandeo específicas para situación de incendio

Resistencia de los elementos mixtos a fuego

Los modelos simplificados para el cálculo de la resistencia de elementos mixtos a fuego se indican en el apartado §4.3 y en los anexos D, E, F, G y H de la norma EN 1994-1-2 para losas y vigas mixtas, vigas y pilares embebidos y pilares rellenos de hormigón.

Como por lo general la temperatura no está distribuida de manera uniforme en la sección transversal, la resistencia de cálculo de un elemento mixto a fuego suele tenerse que calcular dividiendo la sección en una serie de elementos. Se determinan la temperatura y los correspondientes coeficientes de reducción para las resistencias del acero y del hormigón en cada elemento y se suman las resistencias de cálculo de todos los elementos para obtener la resistencia de la totalidad de la sección transversal.

Los modelos simplificados para elementos mixtos son más complejos que para elementos de acero. Por este motivo, la mayor parte de los cálculos del aumento de la temperatura y de la resistencia de elementos mixtos se llevan a cabo mediante software. Además, las resistencias de muchas soluciones constructivas mixtas están tabuladas, como se indica en el apartado §4.2 de la norma EN 1994-1-2.

Resistencia de las losas mixtas

Los modelos simplificados para el cálculo ante incendios de losas mixtas vienen especificados en los apartados §4.3.1, §4.3.2 y §4.3.3 de la norma EN 1994-1-2. Al ser elementos de partición, las losas mixtas tienen que cumplir los criterios de aislamiento "*I*", integridad "*E*" y función portante "*R*". Dichos criterios deben demostrarse mediante ensayos de fuego, cálculos o ambos.

El cálculo de la resistencia a la flexión positiva y negativa de las losas se basa en distintas hipótesis de cálculo y distribuciones de temperatura, como se indica en las secciones D.2 y D.3 de la norma EN 1994-1-2. La contribución de las chapas de acero normalmente se considera en el cálculo de la resistencia a

momentos positivos, pero se ignora, de forma conservadora, en el cálculo de la resistencia a momentos negativos.

Resistencia de las vigas mixtas

Las vigas mixtas están compuestas de perfiles de acero unidos estructuralmente a una losa de hormigón o mixta a través de conectores, pudiendo estar o no embebidas en el hormigón. Por lo general, todos los huecos que generados entre la chapa de acero y las alas de la viga se rellenan, para garantizar que el ala superior de la viga de acero permanezca relativamente fría en el fuego.

Las vigas mixtas pueden estar simplemente apoyadas o ser continuas. Sus resistencias de cálculo a la flexión, al cortante vertical y longitudinal pueden determinarse utilizando los modelos simplificados que se indican en los apartados §4.3.1, §4.3.4 y en el anexo E de la norma EN 1994-1-2.

Resistencia de los pilares mixtos

El modelo simplificado para la resistencia al pandeo de los pilares mixtos está basado en la premisa de que el edificio está arriostrado y el pilar no presenta desplazamiento horizontal. Las reglas de cálculo se indican en el apartado §4.3.5 y en los anexos G y H de la norma EN 1994-1-2.

5 EFECTO MEMBRANA A TRACCIÓN

Los ensayos de fuego a gran escala y las investigaciones en incendios reales en edificios de varias plantas han demostrado que cuando un forjado desarrolla el efecto membrana a tracción, puede alcanzar una mayor resistencia al fuego que los cálculos y los ensayos sobre elementos aislados. Con el fin de tener en cuenta este comportamiento ventajoso de los edificios de varias plantas ante el fuego, se ha desarrollado un nuevo modelo de cálculo, que permite obtener una solución más económica para la situación de incendio. El modelo ha sido validado mediante ensayos.

5.1 Ensayo de fuego Cardington

El enfoque prescriptivo y los modelos de cálculo simplificados descritos en esta guía constituyen métodos comprobados para llevar a cabo el cálculo ante incendios de edificios de varias plantas.

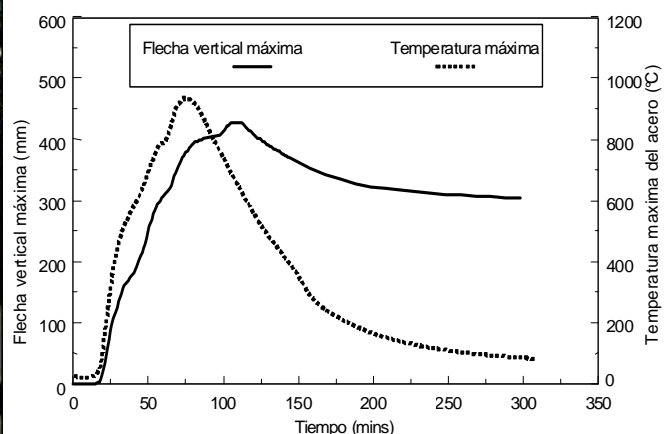
La aplicación de dichos métodos a un edificio de acero de varias plantas sin proteger establece el período de resistencia al fuego en no más de 30 minutos. Sin embargo, los ensayos de fuego a gran escala y las investigaciones de incendios reales durante varios años han demostrado que es posible obtener un ahorro en el cálculo ante incendios de la estructura, por lo que se ha desarrollado un nuevo método de cálculo simplificado (BREW-BM).

5.1.1 Ensayos de fuego a gran escala

Tras las investigaciones llevadas a cabo en edificios afectados por incendios reales en el Reino Unido (Broadgate y Basingstoke), se llevaron a cabo cinco ensayos a gran escala en Cardington (Reino Unido) en un edificio de ocho plantas (Figura 5.1(a)) con estructura mixta, vigas de acero sin proteger y losas mixtas con chapa de perfil trapezoidal.



(a) Edificio ensayado en Cardington



(b) Temperatura y desplazamiento de la viga secundaria

Figura 5.1 Ensayo de fuego de Cardington

Las observaciones de ensayos e investigaciones de incendios reales han demostrado de manera sistemática que el comportamiento del conjunto del edificio de estructura de acero en llamas es muy distinto al de sus elementos

individuales. Bajo las acciones aplicadas en un incendio real, tienen lugar interacciones significativas entre los distintos elementos estructurales, así como importantes cambios en sus mecanismos portantes. El comportamiento inherente de los elementos de edificios con estructura de acero sin proteger, es mucho mejor que el que demostrarían los ensayos con fuego normalizado incluso en incendios importantes.

Tal y como se indica en la Figura 5.1(b), en lugar de ocurrir un desplome total, como cabría esperar de los resultados de los ensayos de fuego normalizado, las vigas secundarias típicas del ensayo de fuego de Cardington mantenían su estabilidad incluso cuando su temperatura alcanzaba 954°C. Su flecha vertical alcanzó 428 mm a la temperatura máxima de 954°C y recuperó parte de esa deformación hasta alcanzar una flecha permanente de 296 mm tras la fase de enfriamiento. Esto indica que existen grandes reservas de resistencia ante incendios en los edificios con estructuras de acero. Se concluyó que la cantidad de protección contra incendios que se aplica a los elementos de acero puede ser, en algunos casos, excesiva e innecesaria.

El principal motivo de la existencia de grandes reservas de resistencia ante incendios en los edificios de varias plantas con estructura metálica se deriva del efecto membrana a tracción de sus forjados mixtos. Dicho efecto se ilustra en la Figura 5.2 y se explica en los párrafos siguientes.

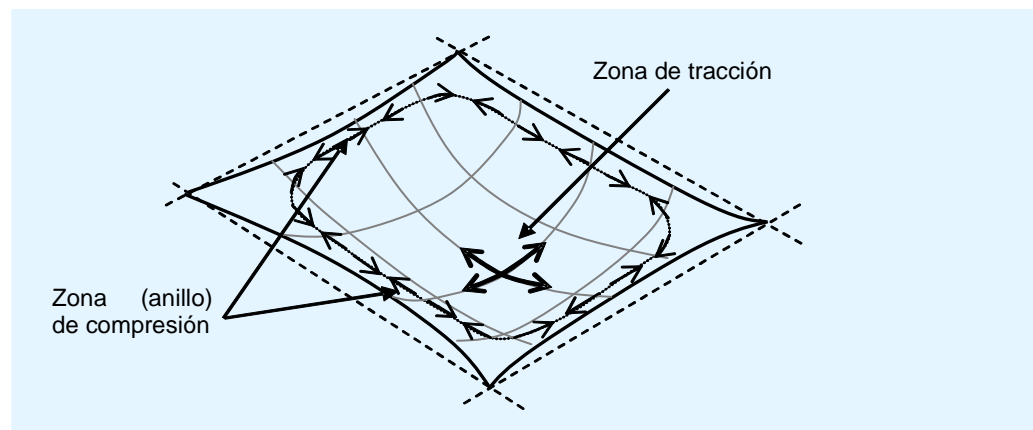


Figura 5.2 Efecto membrana en una losa de hormigón con coacción horizontal

Tal y como se describe en la sección 4, los métodos de cálculo simplificados para el cálculo ante incendios tratan cada elemento de forma individual. Estos métodos asumen que la losa del forjado es una viga unidireccional, que resiste las acciones mediante flexión y cortante. Las observaciones de los ensayos de Cardington, sin embargo, muestran que a medida que las vigas de acero pierden su capacidad portante, la losa mixta utiliza su capacidad de flexión creando un “puente” entre los elementos adyacentes, que permanecen a menor temperatura. A medida que su flecha aumenta, la losa actúa como una membrana trabajando a tracción, como se indica en la Figura 5.3.

Si la losa está bien coaccionada en las vigas primarias y secundarias (que dividen dicha losa en zonas aproximadamente cuadradas), restringiendo adecuadamente su flecha vertical, se puede desarrollar el efecto membrana a tracción como mecanismo portante de carga. Se fuerza una doble curvatura en la losa, de manera que la zona central cuelga como una membrana a tracción.

Se genera una “viga anular” periférica trabajando a compresión, bien en la periferia de la que cuelga la zona central de la losa o en las vigas de extremo, tal y como se indica en la Figura 5.2.

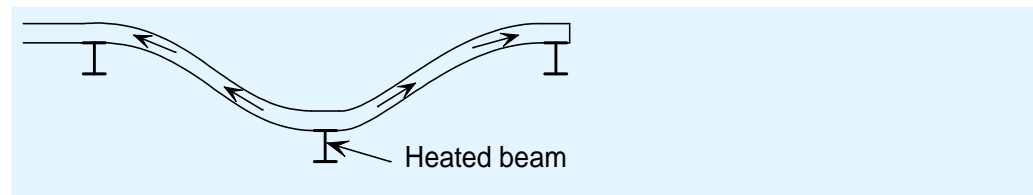


Figura 5.3 Puente formado por la losa debido al efecto membrana a tracción

Así, se forma un mecanismo auto-equilibrado que soporta la carga de la losa. Si la temperatura sigue subiendo, la estructura puede derrumbarse debido al fallo del soporte del extremo de la losa o a la rotura de la losa por los extremos o por su parte central.

5.1.2 Comparación de incendios reales y el fuego normalizado

Además de la diferencia entre el comportamiento de los elementos aislados y el conjunto de los elementos en una estructura, los incendios reales también difieren del fuego normalizado que se emplea en los métodos simplificados. Un incendio real en un edificio está compuesto de tres fases: el crecimiento inicial, el desarrollo pleno y el decaimiento tras alcanzar el pico. Estas fases se muestran en la Figura 5.4. La temperatura aumenta con mayor rapidez cuando todos los materiales orgánicos del sector arden de manera espontánea. Este punto en el tiempo es denominado punto de combustión súbita generalizada (Flashover). El crecimiento y debilitamiento de un incendio real dependen de la cantidad y el tipo de combustible disponible, así como de las condiciones de ventilación del sector.

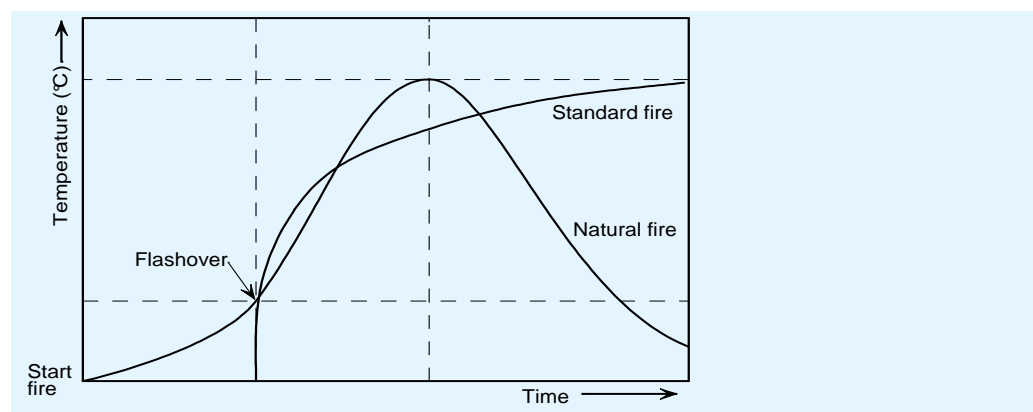


Figura 5.4 Fuego natural real y curva de fuego normalizado (etiquetado como “standard fire” en la figura)

El tiempo de resistencia al fuego de un elemento, que se basa en ensayos con fuego normalizado y métodos de cálculo simplificados, no refleja el comportamiento real ante el fuego del elemento como parte integrante del conjunto del edificio; no indica el tiempo real durante el que el elemento aguantará en un edificio en llamas.

5.2 Ensayos de fuego FRACOF

Con el fin de demostrar el comportamiento real y la resistencia de los forjados mixtos en una exposición a un fuego normalizado, se llevaron a cabo ensayos a gran escala en Maizienes-les-Metz (Francia) en 2008, en el seno del proyecto FRACOF, financiado por ArcelorMittal y Steel Alliance.

La Figura 5.5 muestra el forjado mixto, con una superficie superior a 60 m² y la superficie inferior expuesta. Todos los elementos estructurales del forjado mixto se calcularon de conformidad con los Eurocódigos pertinentes para el cálculo a temperatura ambiente. El forjado se cargó de manera uniforme con sacos de arena. Los cuatro pilares de acero y las cuatro vigas perimetrales estaban protegidas contra el fuego, pero se dejaron sin proteger las dos vigas secundarias intermedias.

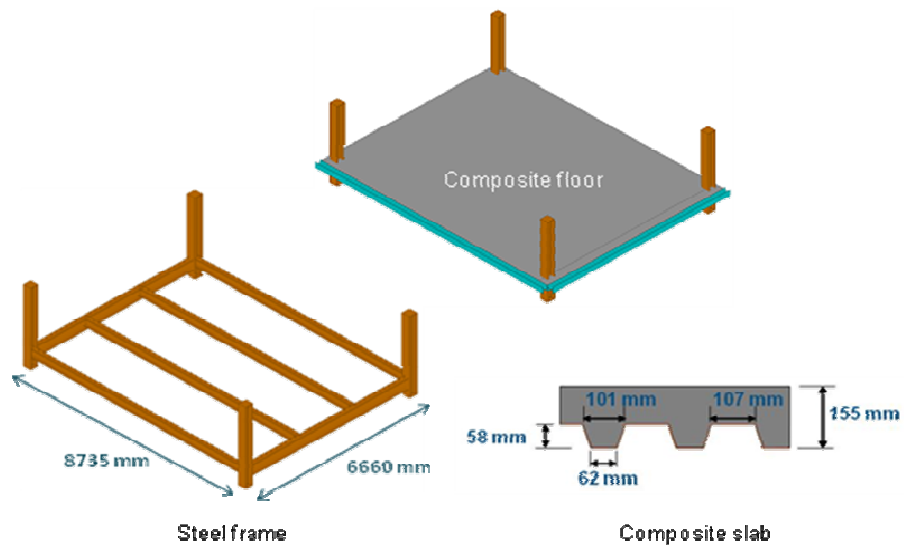


Figura 5.5 Detalles de los ensayos a gran escala realizados en un forjado usado en FRACOF

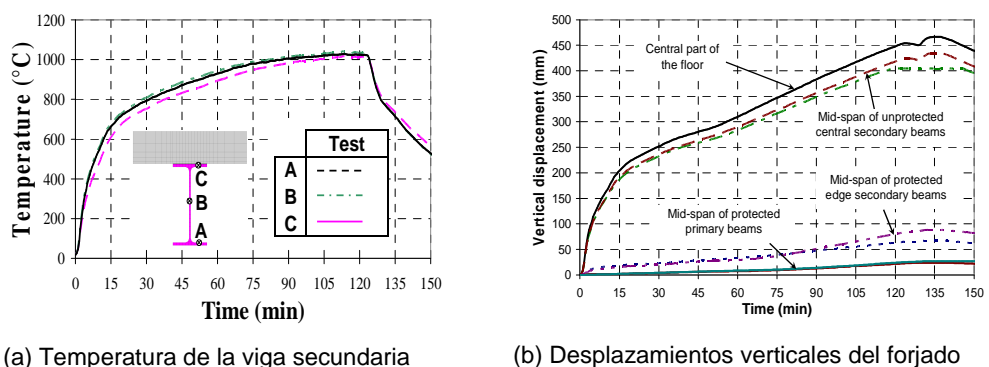


Figura 5.6 Resultados de los ensayos a gran escala realizados en forjados mixtos

Tal y como se indica en la Figura 5.6, bajo un fuego normalizado y con las cargas aplicadas, incluso cuando la temperatura de la viga sin proteger subió hasta 1040°C y la flecha central aumentó a 448 mm, la construcción del forjado

mixto mantuvo su estabilidad estructural durante más de 120 minutos. Esto demuestra que la resistencia al fuego de los forjados mixtos con vigas secundarias sin proteger es mucho mejor que los 15 minutos que adelantan los ensayos con fuego normalizado.

5.2.1 Conceptos de cálculo

Partiendo de los resultados de los ensayos de fuego a gran escala y de las observaciones en incendios reales, se ha desarrollado un nuevo concepto de cálculo para evaluar el comportamiento de edificios de varias plantas con estructura de acero y forjados mixtos sometidos a fuego.

5.2.2 Modelos de cálculo

Este modelo adopta un enfoque holístico, en lugar de uno elemental. Calcula la resistencia residual de los forjados mixtos haciendo uso de las líneas de fluencia y del efecto membrana, tal y como se indica en la Figura 5.7.

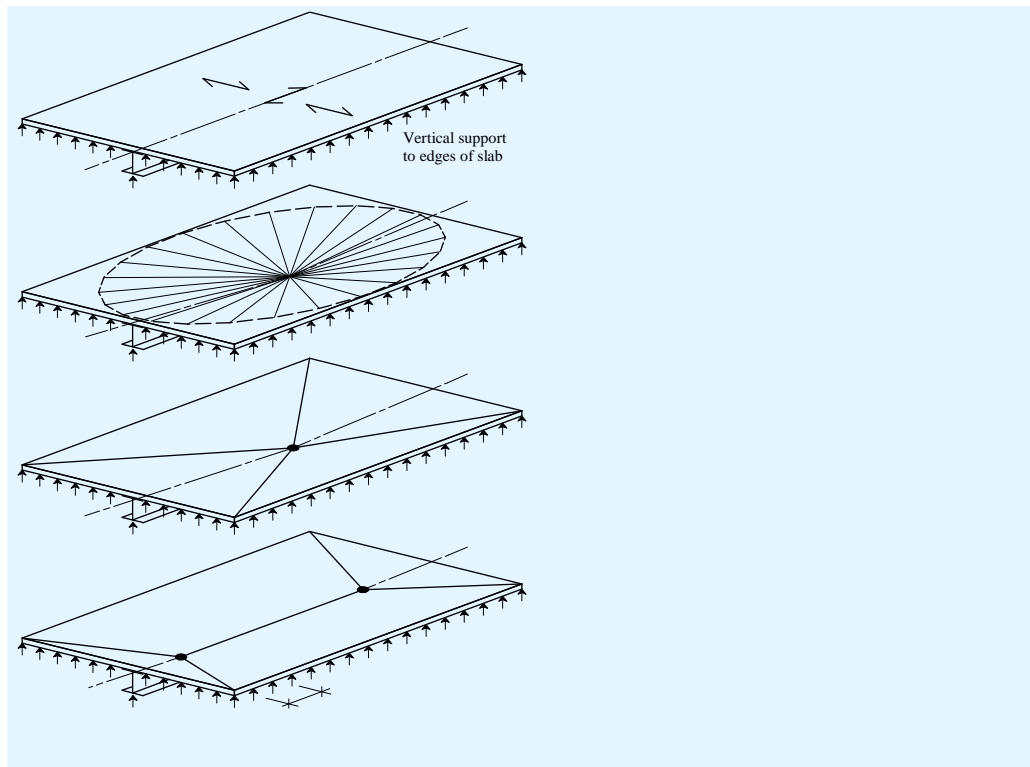


Figura 5.7 Líneas de fluencia y efecto membrana de un forjado mixto a fuego

Este modelo de cálculo tiene en cuenta la interacción entre los componentes del forjado mixto, y concluye que algunas vigas pueden quedar sin proteger manteniendo el nivel de seguridad ante incendios necesario. Así, este modelo de cálculo proporciona una solución de seguridad ante incendios más económica y adecuada a cada situación, al dejar un importante número de vigas de acero del forjado mixto sin proteger.

Este modelo de cálculo se calibró comparándolo con los ensayos de fuego y está complementado por las tablas de cálculo y un programa informático. Sin embargo, su utilización requiere conocimientos y experiencia en el cálculo ante incendios en edificios de varias plantas. Para más información, se puede consultar la publicación P388 del SCI^[6].

5.2.3 Aplicabilidad

El modelo de cálculo FRACOF puede utilizarse únicamente para demostrar la resistencia al fuego de una estructura parcialmente protegida cuando las normativas nacionales sobre edificios permiten el uso de métodos basados en prestaciones para el cálculo ante incendios. Además, este modelo de cálculo sólo se puede aplicar en edificios con estructura de acero con las siguientes limitaciones.

- La estructura está arriostrada y no es traslacional
- Las losas mixtas del forjado están compuestas de una chapa de acero y hormigón armado
- Las vigas del forjado están diseñadas para actuar de manera conjunta con la losa del forjado

Este modelo no puede utilizarse con sistemas de forjado de hormigón prefabricado.

6 USO DE LA EXPOSICIÓN A UN FUEGO NATURAL Y MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL AVANZADA

En esta sección se presentan modelos de cálculo avanzados empleados para demostrar el comportamiento real de los edificios de varias plantas afectados por un incendio y explorar soluciones más económicas para el cálculo ante incendios.

6.1 Aspectos generales

Hasta la fecha, tanto las tablas de productos como los métodos de cálculo simplificados han sido ampliamente utilizados en el diseño ante incendios de edificios de varias plantas. Se ha demostrado que dichos métodos son adecuados para cumplir los requisitos mínimos de salvaguardia de la vida. Sin embargo, no tienen en cuenta las características de un fuego real y la interacción entre los elementos estructurales en un incendio. Además, la creciente innovación de cálculo, construcción y uso de los edificios modernos hace que en ocasiones sea complicado satisfacer las normativas legales sobre incendios, desde el punto de vista económico, utilizando los métodos simplificados. Estos motivos resultaron en el desarrollo de los modelos de cálculo avanzados para el diseño ante incendios de edificios de varias plantas.

Los modelos de cálculo avanzados se basan en la descripción física fundamental del desarrollo del fuego, la transferencia del calor y la respuesta estructural, que se simulan mediante modelos numéricos. Y como tal ofrecen una solución más realista y económica para el cálculo ante incendios de una estructura. Los modelos de cálculo avanzados pueden utilizarse para representar el comportamiento de los elementos individuales, la totalidad de la estructura o sus sub-montajes. Posibilitan una apreciación de la manera en la que los edificios se comportan de verdad en un incendio y ofrecen la opción de diseñar un edificio más sólido.

El cálculo basado en prestaciones implica el establecimiento de criterios de comportamiento, la definición de las acciones en situación de incendio, la modelización de la transferencia del calor y la simulación de la respuesta estructural a las elevadas temperaturas que se darán como consecuencia del incendio, tal y como se describe sucintamente a continuación.

6.2 Modelización de la severidad del fuego

6.2.1 Modelo de dos zonas

En el Anexo D de la norma EN 1991-1-2 propone un modelo de dos zonas para determinar la temperatura ocasionada por un fuego localizado. Parte de la premisa de que los productos de combustión de un sector se acumulan en una capa bajo el techo. Divide el sector de incendio, en el que puede haber diferentes cargas de fuego, en una serie de zonas. Se considera que en cada zona, hay una carga de fuego uniforme, y que la temperatura del gas se define

como función del tiempo, aplicando el principio de la conservación de masa y energía en el sector de incendio. En cada zona, se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes mediante programas informáticos para obtener el valor de la temperatura.

6.2.2 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

El Anexo D de la norma EN 1991-1-2 propone un modelo de dinámica computacional de fluidos (CFD) para un fuego localizado. La CFD implica el flujo del fluido, la transferencia de calor y los fenómenos asociados. Emplea una serie de ecuaciones diferenciales parciales para determinar la temperatura dentro de la sección debido a un fuego localizado. La modelización de fuegos mediante CFD requiere que la persona que lleve a cabo la tarea tenga suficiente experiencia para definir los parámetros de entrada y evaluar los resultados.

6.2.3 Fuego totalmente desarrollado

La definición de un fuego totalmente desarrollado se presenta en la sección 4.1.3, donde también se definen el fuego normalizado y el fuego paramétrico. Estas curvas de fuego resultan de aplicación para los métodos simplificados así como para los modelos avanzados.

6.3 Modelización de la transferencia de calor

El aumento de temperatura de un elemento estructural en llamas se debe a la transferencia de calor del gas del sector de incendio al elemento, que ocurre predominantemente mediante los fenómenos de radiación y convección.

El objetivo de los modelos avanzados es proporcionar una solución más realista del aumento de la temperatura en la sección de un elemento estructural. Los modelos avanzados tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Las acciones térmicas indicadas en la EN 1991-1-2
- La exposición térmica no uniforme
- La transferencia de calor no uniforme
- Las condiciones de contorno que son función del tiempo
- Las propiedades de los materiales que son función del tiempo y de la temperatura

Los modelos avanzados de transferencia del calor se desarrollan en base a métodos de diferencias finitas o de elementos finitos en 2D o en 3D. Por ello, sólo pueden llevarse a cabo mediante paquetes de programas informáticos comerciales.

6.4 Modelos estructurales avanzados

Los modelos avanzados para las respuestas estructurales a las acciones térmicas y las acciones aplicadas se basan en los principios fundamentales de la ingeniería estructural y se llevan a cabo mediante técnicas de elementos finitos.

La estructura en cuestión se divide en pequeños elementos en 2D o 3D con las condiciones iniciales y de contorno correspondientes. La simulación con

elementos finitos proporciona mucha información de interés para el diseñador, pero este enfoque no debería llevarse a cabo a la ligera. Existen problemas potenciales asociados a:

- La elección del software
- Las opciones configuradas en el software
- La construcción del modelo
- Los criterios de aceptación utilizados

6.5 Validación/verificación de los modelos avanzados

Para asegurar que la solución que se obtiene es correcta y teniendo en cuenta que existen varios modelos para la acción del fuego y para las respuestas térmica y estructural de los edificios, se deben llevar a cabo una validación y una verificación.

La validación es la demostración de la adecuación del modelo o método de cálculo para el fin deseado. Esto incluye las predicciones de la severidad del fuego, de la transferencia de calor y de la respuesta estructural.

La verificación es la evaluación de si los resultados proporcionados por un modelo de cálculo son válidos o no. Incluye una comprobación minuciosa de los datos introducidos, de la coherencia de los resultados obtenidos con los resultados anticipados mediante un análisis cualitativo, y del nivel de riesgo asociado a los posibles errores. Los modelos avanzados deberían verificarse mediante comparación con los resultados de ensayos pertinentes y otros métodos de cálculo. Debería comprobarse que cumplen los principios básicos de ingeniería llevando a cabo los análisis de sensibilidad correspondientes.

En el contexto de la validación y la verificación de los modelos y los resultados, la norma ISO 16730^[7] proporciona un marco para la evaluación, verificación y validación de todos los tipos de métodos de cálculo utilizados como herramientas en la ingeniería de seguridad contra incendios. Esta norma internacional no se centra en ningún modelo de fuego específico, sino que pretende ser aplicable tanto a los métodos simplificados como a los avanzados.

6.6 Aprobación de los cálculos

La complejidad a la hora de obtener la aprobación del diseño variará de un país a otro. Sin embargo, los organismos reguladores pueden exigir al diseñador que presente un cálculo ante incendios de forma que pueda ser comprobado con facilidad por un tercero, con cada paso de cálculo claramente documentado, incluidas todas las hipótesis y aproximaciones que se hayan efectuado. Se debería incluir una lista de comprobaciones que incluya el método de cálculo en su totalidad, el modelo de fuego, la transferencia de calor y la respuesta estructural.

REFERENCIAS

1. Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción.
2. EN 1991-1-2:2002 Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego
3. EN 1993-1-2:2005 Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales. Cálculo de estructuras sometidas al fuego
4. EN 1994-1-2:2005 Eurocódigo 4. Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego
5. EN 13381 Ensayos para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales.
EN 13381-4 Protección pasiva aplicada a elementos de acero
EN 13381-8 Protección reactiva aplicada a los elementos de acero
6. SIMMS, W. I. and ZHAO, B
Fire resistance assessment of partially protected composite floors (FRACOF) design guide (P388)
The Steel Construction Institute, 2009.
7. ISO 16730: 2008 EDTN1, Fire safety engineering - Assessment, verification and validation of calculation methods

BIBLIOGRAFÍA

1. One stop shop in structural fire engineering
<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/>
2. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied protection to steel members
3. Introduction to fire safety of structures
Institution of Structural Engineers, 2003
4. HAM, S. J., NEWMAN, G. M., SMITH, C. I. and NEWMAN, L. C.
Structural fire safety - A handbook for architects and engineers (P197)
The Steel Construction Institute, 1999
5. British Automatic Sprinkler Association Ltd (BASA), Information file, sprinklers in warehouse, <http://www.bafsa.org.uk/snews.php> (accessed on 24th June, 2009).
6. ECCS, Fire design information sheets, Publication NO.82, Brussels, 1997
7. KIRBY, B. R.
Fire resistance of steel structure
British Steel, 1991
8. Fire protection for structural steel in buildings (4th edition)
Association for specialist fire protection, 2008
9. Fire resistance of steel-framed buildings
Corus, 2006

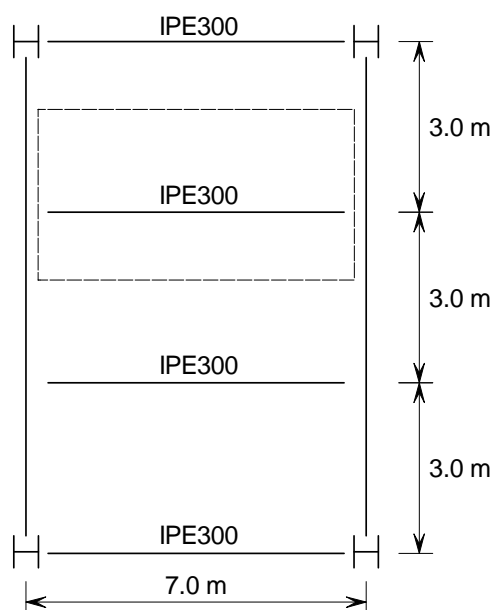
10. LAWSON, R. M. and NEWMAN, G. M.
Structural fire design to EC3 and EC4, and comparison with BS 5950 (P159)
The Steel Construction Institute, 1996
11. RACKHAM, J. W., COUCHMAN, G. H. and HICKS, S. J.
Composite slabs and beams using steel decking: Best practice for design and construction - Revised edition (P300),
The Steel Construction Institute, 2009
12. LAWSON, R. M.
Design of composite slab (P055)
The Steel Construction Institute, 1989
13. Comflor[®], Composite floor decks
Corus, 2007
14. LAWSON, R. M. , MULLETT, D. L. and RACKHAM, J. W.
Design of asymmetric *slimflor* beam using deep composite decking (P175)
The Steel Construction Institute, 1997
15. MULLETT, D. L. and LAWSON, R. M.
Design of *slimflor* fabricated beam using deep composite decking (P248)
The Steel Construction Institute, 1999
16. MULLETT, D. L.
Slim floor design and construction (P110)
The Steel Construction Institute, 1992
17. MULLETT, D. L.
Design of RHS *Slimflor* edge beam (P169)
The Steel Construction Institute, 1992
18. BAILEY, C. G, NEWMAN, G. M, and SIMMS, W. I.
Design of steel framed buildings without applied fire protection (P186)
The Steel Construction Institute, 1999
19. LAWSON, R. M. and O'BRIEN, T.
Fire safety of external steelwork (P009)
The Steel Construction Institute, 1981
20. NEWMAN, G. M., ROBINSON, J. T. and BAILEY, C. G,
Fire safe design: A new approach to multi-storey steel-framed buildings - Second Edition (P288)
The Steel Construction Institute, 2006
21. BAILEY, C. G. and MOORE, D. B.
The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire,
Part 1: Theory
The Structural Engineer, 2000
22. BAILEY, C. G. and MOORE, D. B.
The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire,
Part 2: Design
The Structural Engineer, 2000
23. ZHAO, B. ROOSEFID, M. and VASSART, O.
Full scale test of a steel and concrete composite floor exposed to ISO fire and corresponding numerical investigation
Eurosteel Conference 2008, 5th European conference on steel and composite structures, Graz, Austria, 2008

24. PURKISS, J. A.
Fire safety engineering design of structures
Butterworth-Heinemann, 1996
25. BAILEY, C. G and MOORE, D. B.
Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire
Engineering Structures 26, Elsevier, 2004
26. Guide to the advanced fire safety of structures
Institution of Structural Engineers, 2007

Ejemplo resuelto: Estrategias de seguridad ante incendio y proyecto de cálculo de vigas

El presente ejemplo describe el cálculo de seguridad ante el fuego para una viga de acero simplemente apoyada, utilizando las estrategias de fuego y cálculo descritas en esta publicación. Se abordan cinco estrategias diferentes que proporcionan al proyectista diferentes alternativas para el diseño de la solución ante incendios. Las estrategias que se presentan son la protección pasiva, el uso de soluciones estructurales alternativas, métodos de cálculo simplificados, efecto membrana a tracción y el software FRACOF. Para verificar la resistencia de la viga al fuego se utilizan métodos prescriptivos y los métodos de cálculo simplificados

La figura muestra un sistema de forjado típico de un edificio de oficinas de varias plantas. Las vigas están simplemente apoyadas y requieren una resistencia al fuego de 60 m cuando están sometidas a un fuego normalizado, es decir R60. Este ejemplo se centra en el cálculo de una de las vigas secundarias, de perfil IPE330 en acero S275, que deberá resistir y transmitir la carga de la zona delimitada mediante línea discontinua.



Construcción del forjado

1. Datos de cálculo

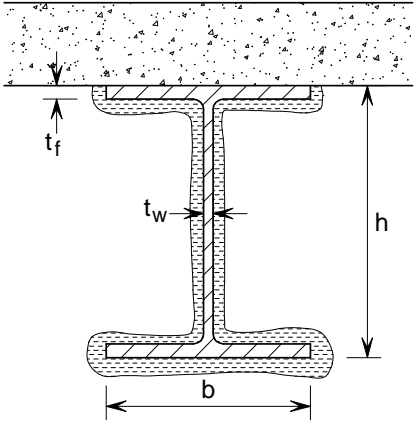
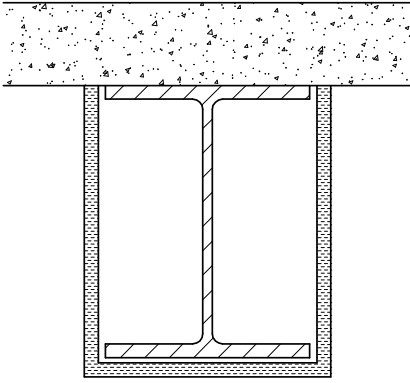
1.1. Propiedades del acero

Límite elástico: $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$

Módulo elástico: $E = 210 \text{ kN/mm}^2$

Densidad: $\rho_a = 7850 \text{ N/mm}^2$

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	2 de 10
<p>1.2. Acciones aplicadas</p> <p>Acciones permanentes: $g_k = 3,5 \text{ kN/m}^2$ (peso propio de la viga y la losa)</p> <p>Acciones variables: $q_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$ (sobrecarga de uso del forjado)</p> <p>1.3. Coeficientes parciales</p> <p>Acciones permanentes: $\gamma_G = 1,35$</p> <p>Acciones variables: $\gamma_Q = 1,5$</p> <p>Resistencia de la sección transversal: $\gamma_{M0} = 1,0$</p> <p>Situación de incendio: $\gamma_{M,fi} = 1,0$</p> <p>1.4. Sistema de forjado</p> <p>Vano entre vigas: $B = 3,0 \text{ m}$</p> <p>Luz de viga: $L = 7,0 \text{ m}$</p> <p>2. Comprobaciones para temperatura ambiente</p> <p>2.1. Acciones a temperatura ambiente</p> <p>Valor característicos de las acciones:</p> $w_k = 3,5 + 3,0 = 6,50 \text{ kN/m}^2$ <p>Valor de cálculo de las acciones:</p> $w_d = 1,35 \times 3,5 + 1,5 \times 3,0 = 9,23 \text{ kN/m}^2$ <p>Momento flector:</p> $M_{Ed} = w_d B L^2 / 8 = 9,23 \times 3 \times 7^2 / 8 = 169,5 \text{ kNm}$ <p>Cortante:</p> $V_{Ed} = w_d B L / 2 = 9,23 \times 3 \times 7 / 2 = 96,9 \text{ kN}$ <p>2.2. Resistencia a temperatura ambiente</p> <p>2.2.1. Clasificación de secciones transversales</p> <p>Considerando las propiedades geométricas de un IPE300 y en conformidad con las reglas mencionadas en la sección 5.5 de la EN 1993-1-1, el IPE330 es un perfil de Clase 1.</p> <p>2.2.2. Cálculo de resistencia</p> <p>Se asume que el forjado de hormigón proporciona una coacción lateral al ala de compresión, por lo que no hace falta calcular el pandeo lateral-torsional de la viga. Las comprobaciones de la sección transversal son las siguientes:</p> <p>Resistencia a momento flector:</p> $M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628 \times 10^3 \times 275}{1,0} \times 10^{-3} = 172,7 \text{ kNm} > 169,5 \text{ kNm} \quad \therefore \text{OK}$ <p>Resistencia a cortante:</p> $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{2567 \times 275}{\sqrt{3} \times 1,0} = 407,7 \text{ kN} > V_{Ed} = 96,6 \text{ kN} \quad \therefore \text{OK}$		<p>EN 1993-1-1, §5.5</p> <p>EN 1993-1-1, §6</p>

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	3 de 10
<p>2.2.3. Flecha</p> $\delta = \frac{5}{384} \frac{w_k BL^4}{EI} = \frac{5}{384} \frac{6,5 \times 3000 \times 7000^4}{210000 \times 8356 \times 10^4} \times 10^{-3} = 34,7 \text{ mm} < \frac{L}{200} = 35 \text{ mm} \therefore \text{OK}$ <p>Por lo tanto, el perfil IPE seleccionado satisface los requisitos en condiciones de temperatura ambiente.</p> <p>3. Estrategias de seguridad ante el fuego y métodos de cálculo</p> <p>La finalidad del cálculo de seguridad ante incendio es demostrar que la viga cumple con el requisito de resistencia al fuego de 60 minutos, R60.</p> <p>3.1. Protección pasiva contra incendios</p> <p>Las protecciones pasivas pueden ser en forma de placas, con sprays no reactivos o con pinturas intumescentes.</p> <p>3.1.1. Factor de forma de la viga no protegida / protegida</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  $A/V = \frac{1,5b + h - t_w}{(b - t_w)t_f + 0,5ht_w}$ </div> <div style="text-align: center;">  $A/V = \frac{0,5b + h}{(b - t_w)t_f + 0,5ht_w}$ </div> </div> <p>3 opciones de protección lateral y relaciones A/V. (a) protección de 3 lados del perfil; (b) protección en cajón por 3 lados</p> <p>Tanto para perfiles no protegido como perfiles protegido por 3 lados con spray no reactivo o con pintura intumescente, según lo indicado en la parte (a) de la figura, el factor de forma es:</p> $A_m/V = \frac{(1,5b + h - t_w)}{[(b - t_w)t_f + 0,5ht_w]} = \frac{(1,5 \times 150 + 300 - 7,1)}{[(150 - 7,1)10,7 + 0,5 \times 300 \times 7,1]} = 200 \text{ m}^{-1}$ <p>En el caso de protección en cajón por 3 lados, según lo indicado en la parte (b) de la figura, el factor de forma es:</p> $[A_m/V]_b = \frac{(0,5b + h)}{[(b - t_w)t_f + 0,5ht_w]} = \frac{(0,5 \times 150 + 300)}{[(150 - 7,1)10,7 + 0,5 \times 300 \times 7,1]} = 145 \text{ m}^{-1}$		<p>3 de 10</p>

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	4 de 10
<p>3.1.2. Paneles de protección contra el fuego El factor de forma de la viga es: $A_m/V = 200 \text{ m}^{-1} < [A_m/V]_{\max} = 260 \text{ m}^{-1}$ \therefore Protección en panel 20 mm de espesor es adecuado para R60.</p> <p>3.1.3. Sprays no reactivos $A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}$ \therefore 16 mm de espesor de spray no reactivo es adecuado para R60.</p> <p>3.1.4. Pinturas intumescentes $A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}$, \therefore 0,69 mm de espesor de pintura intumescente es adecuado para R60.</p> <p>3.2. Soluciones estructurales alternativas Para evitar los costes adicionales de los materiales de protección y reducir los costes de construcción, es preferible usar perfiles no protegidos, siempre que las soluciones estructurales alternativas cumplan con el requisito de R60. Estas incluyen el uso de vigas embebidas en hormigón o de losas mixtas. Estas opciones serán abordadas en los apartados siguientes.</p> <p>3.2.1. Viga parcialmente embebida Nivel de carga: $\eta_{fi} = 0,477 < 0,5$ Relación sección: $h/b = 300/150 = 2,0 > 1,5$. Por lo tanto para una resistencia al fuego R60, una viga parcialmente embebida en hormigón en masa puede cumplir con el requisito R60. Nota: el peso adicional del hormigón debe ser añadido a la acción permanente.</p> <p>3.2.2. Vigas integradas Se emplean perfiles de acero asimétricos con la viga integrada en el canto de la losa de hormigón prefabricada. Esta solución puede satisfacer el requisito R60 sin la necesidad de protección ante incendios.</p> <p>3.3. Modelos de cálculo simplificados Para comprobar la resistencia al fuego de la viga en el estado límite último de fuego, se utiliza el método simplificado indicado en la norma EN 1993-1-1, siguiendo el diagrama de flujo de la sección 4.4 de esta publicación. Este método se aplica tanto a perfiles no protegidos como perfiles protegidos con paneles. En la sección siguiente se presentan los cálculos en base al método de la función portante. Se utilizan diferentes espesores de protección con el objetivo de optimizar la solución. El método de la temperatura crítica sólo es aplicable cuando toda la sección transversal está a la misma temperatura, y no se muestra en este ejemplo.</p>		<p>Tabla 3.1</p> <p>Tabla 3.2</p> <p>Tabla 3.3</p> <p>Tabla 3.7</p> <p>Sección 3.3.2</p>

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	5 de 10									
<p>3.3.1. Temperatura de la viga tras 60 minutos de exposición al fuego</p> <p>Para determinar el aumento de temperatura en los perfiles no protegidos y los perfiles protegidos se utiliza el procedimiento de cálculo incremental y los siguientes modelos indicados en la norma EN 1993-1-2; apartado §4.2.5.1.</p> <p>Para un perfil no protegido:</p> $\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{1}{c_a \rho_a} \frac{A_m}{V} \dot{h}_{net} \Delta t$ <p>k_{sh} es el coeficiente de corrección del efecto sombra, calculado para un perfil IPE de la siguiente manera:</p> $k_{sh} = 0,9 \frac{A_m / V}{[A_m / V]_b} = 0,9 \frac{145}{200} = 0,652$ <p>Para perfiles protegidos (suponiendo que se utilizaran paneles de protección):</p> $\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}$ $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$ <p>El flujo de calor neto es: $\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$</p> <p>Convección:</p> $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) = 25 \times (\theta_g - \theta_{at})$ <p>Radiación:</p> $\begin{aligned} \dot{h}_{net,r} &= \sigma \varepsilon_m \varepsilon_f \Phi [(\theta_t + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \\ &= 5,67 \times 10^{-8} \times 0,7 \times 1,0 \times 1,0 \times [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_{at} + 273)^4] \end{aligned}$ <p>La curva de fuego normalizada viene definida por la siguiente expresión:</p> $\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1)$ <p>Las ecuaciones anteriores son evaluadas en base a las siguientes propiedades térmicas del acero y de los materiales de protección del panel:</p> <table border="0"> <tr> <td>$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$</td> <td>$c_p = 1200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$</td> <td>$d_{p,5} = 0,005 \text{ m}$</td> </tr> <tr> <td>$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$</td> <td>$\rho_p = 300 \text{ kg/m}^3$</td> <td>$d_{p,10} = 0,01 \text{ m}$</td> </tr> <tr> <td>$\Delta t = 5 \text{ sec}$</td> <td>$\lambda_p = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$</td> <td>$d_{p,20} = 0,02 \text{ m}$</td> </tr> </table> <p>Con estos datos y ecuaciones, se puede generar el gráfico de la figura de abajo, en el que se muestran los cambios de temperatura del aire, de los perfiles no protegidos y de perfiles protegidos con 3 espesores de protección: 5 mm, 10 mm y 20 mm.</p>			$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	$c_p = 1200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	$d_{p,5} = 0,005 \text{ m}$	$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$	$\rho_p = 300 \text{ kg/m}^3$	$d_{p,10} = 0,01 \text{ m}$	$\Delta t = 5 \text{ sec}$	$\lambda_p = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	$d_{p,20} = 0,02 \text{ m}$
$c_a = 600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	$c_p = 1200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	$d_{p,5} = 0,005 \text{ m}$									
$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$	$\rho_p = 300 \text{ kg/m}^3$	$d_{p,10} = 0,01 \text{ m}$									
$\Delta t = 5 \text{ sec}$	$\lambda_p = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	$d_{p,20} = 0,02 \text{ m}$									

<p>Titulo</p>	<p>Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado</p>	<p>6 de 10</p>
<div data-bbox="188 241 1201 1041"> <p style="text-align: center;">Gas and member temperature rise</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Time (minutes)</p> <p> — Gas — Perfil no protegido — Protección de panel de 5 mm — Protección de panel de 10 mm — Protección de panel de 20 mm - - - Temperatura crítica </p> </div> <p>Aumento de la temperatura del gas y de la viga por exposición a fuego natural</p> <p>3.3.2. Resistencia</p> <p>Efectos de las acciones en situación de incendio</p> <p>Tomando como base la regla simplificada de la norma EN 1991-1-2, el efecto de las acciones en situación de incendio pueden determinarse reduciendo las de calculo a temperatura ambiente con el coeficiente de reducción η_{fi}</p> <p>En edificios de oficinas, el factor de combinación para la acción accidental del fuego con una acción variable es $\psi_{fi} = \psi_{2.1} = 0,3$, y el coeficiente de reducción:</p> $\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_k}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k} = \frac{3,5 + 0,3 \times 3,0}{1,35 \times 3,5 + 1,50 \times 3,0} = 0,477$ <p>Por lo que los efecto de cálculo de las acciones en situación de incendio son:</p> <p>Momento flector: $M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} = 0,477 \times 169,5 = 80,9 \text{ kNm}$</p> <p>Cortante: $V_{fi,Ed} = \eta_{fi} V_{Ed} = 0,477 \times 96,9 = 46,2 \text{ kN}$</p> <p>Clasificación de sección</p> <p>Para el cálculo a fuego, el valor de ε es igual al 85% de dicho valor para un cálculo a temperatura ambiente</p> $\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,72$		

EN 1993-1-2;
§4.2.2

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	7 de 10
	<p>Las relaciones para pandeo local de las diferentes partes de las secciones son:</p> <p>Ala: $c_t/t_f = 5,28 < [c_t/t_f]_{lim} = 9\varepsilon = 7,07$</p> <p>Alma: $c_w/t_w = 35,01 < [c_w/t_w]_{lim} = 72\varepsilon = 56,57$</p> <p>El perfil es clase 1.</p> <p>Resistencia de la viga tras 60 minutos de exposición al fuego</p> <p>La resistencia a flexión de una viga con temperatura no uniforme en toda su sección transversal se calcula utilizando la siguiente formula:</p> $M_{fi,Rd} = M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} W_{pl,y} f_y / (\kappa_1 \kappa_2)$ <p>Donde</p> <p>$k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para la relación tensión – deformación</p> <p>κ_1, κ_2 son factores de adaptación para temperatura no uniforme en la sección transversal y en la longitud de la viga</p> <p>Viga no protegida</p> <p>La temperatura de la viga sin protección tras 60 minutos de exposición al fuego, conforme a lo indicado en la figura de la Hoja 6, es:</p> $\theta_{at} = 935^\circ\text{C}$ <p>El coeficiente de reducción para la relación tensión – deformación se puede obtener para las siguientes temperaturas:</p> $\theta_a = 900^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,060$ $\theta_a = 1000^\circ\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,040$ <p>Interpolando para $\theta_a = 935^\circ\text{C}$, obtendremos:</p> $k_{y,\theta} = 0,052$ <p>En el caso de una viga no protegida con tres lados expuestos, con una losa mixta o una losa de hormigón en el cuarto lado:</p> $\kappa_1 = 0,70$ <p>y si los apoyos de la viga no son estáticamente indeterminados:</p> $\kappa_2 = 0,85$ <p>Por lo que, la resistencia a flexión de la viga es la siguiente:</p> $M_{fi,Rd} = 0,052 \times 628 \times 10^3 \times 275 / (0,7 \times 1,0) \times 10^{-6} = 12,83 \text{ kNm} < 80,9 \text{ kNm}$ <p>Por lo tanto, se puede concluir que el perfil no protegido no sería seguro.</p> <p>Protección de panel de 10 mm</p> <p>Conclusión: el perfil requiere cierta protección. En base a los resultados de los anteriores cálculos simplificados en base a la temperatura, la opción a explorar sería la utilización de un panel de protección contra el fuego de 10 mm de espesor. Como se ha demostrado anteriormente, esta solución es segura.</p>	<p>EN 1993-1-2; Tabla 3.1</p> <p>EN 1993-1-2; §4.2.3.3</p> <p>∴ FALLA</p>

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	8 de 10
	<p>Según la figura anterior la temperatura de esta solución, tras 60 minutos de exposición al fuego, sería:</p> $\theta_{at} = 594^{\circ}\text{C}$ <p>El coeficiente de reducción para la relación tensión - deformación:</p> $\theta_a = 500^{\circ}\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,780$ $\theta_a = 600^{\circ}\text{C} \quad k_{y,\theta} = 0,470$ <p>Interpolando para $\theta_a = 594^{\circ}\text{C}$, obtendremos:</p> $k_{y,\theta} = 0,46$ <p>Los coeficientes κ_1 y κ_2 serían como se han calculado anteriormente.</p> <p>La resistencia a flexión de la viga, con el ala de compresión completamente coaccionada y una temperatura no-uniforme en su sección transversal, será:</p> $M_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \frac{W_{pl,y} f_y}{\kappa_1 \kappa_2} = 0,46 \frac{628 \times 10^3 \times 275}{0,7 \times 1,0} \times 10^{-6} = 113 \text{ kNm} > 80,9 \text{ kNm}$ <p>La resistencia a cortante se obtiene con la siguiente ecuación:</p> $V_{fi,Rd} = k_{y,\theta} \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 0,46 \frac{2567 \times 275}{\sqrt{3} \times 1,0} = 187,5 \text{ kN} > 96,6 \text{ kN}$ <p>El perfil protegido en cajón por 3 lados y con paneles de protección contra el fuego, es seguro.</p> <p>3.4. Uso del efecto de membrana a tracción</p> <p>En base a los ensayos de fuego e investigaciones de situaciones reales de fuego se puede concluir que el uso de forjados mixtos con chapas de acero proporciona una mayor resistencia que lo que indican los resultados obtenidos mediante la aplicación de los cálculos simplificados del Eurocódigo.</p> <p>Siempre y cuando la flecha vertical de la losa esté bien coaccionada sobre las líneas que la dividen en áreas aproximadamente cuadradas, se puede hacer uso del efecto membrana como mecanismo portante, proporcionando al sistema una resistencia que los modelos simplificados no contemplan.</p> <p>Por lo tanto, se puede concluir que la viga en este ejemplo se podría dejar sin protección, y que la misma tendría el nivel seguridad requerido por el EC3. Se ha demostrado que este sistema de construcción proporciona una mayor resistencia contra el fuego para vigas secundarias pero no para vigas primarias. Por lo tanto, se deben tomar las medidas adecuadas cuando se adopte esta solución como solución ante incendio.</p> <p>3.5. FRACOF</p> <p>El software FRACOF puede utilizarse para determinar si las vigas de acero secundarias y no protegidas son adecuadas en la construcción mixta.</p>	<p>∴ OK</p> <p>∴ OK</p> <p>∴ OK</p> <p>Sección 8</p>

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado										9	de	10																																																																																																																																																																																				
<p>A título de ejemplo, se considera la viga IPE300, en acero S275 como viga mixta, con las siguientes características para su modelización en Fracof:</p> <ul style="list-style-type: none">• Vigas primarias IPE550, S275• Chapa Cofrastra 40• Losa de 130 mm de profundidad, en hormigón C25/30• Malla ST 40 C, 500 N/mm²• Suponiendo que todas las vigas llevan una conexión a cortante de l 100% <p>El valor de cálculo de las acciones a temperatura normal es de 9,23 kN/m². El coeficiente de reducción es de 0,477, lo que proporciona una acción en situación de incendio de 4,4 kN/m².</p> <p>Con estos datos de entrada, Fracof concluye que es adecuado utilizar vigas secundarias IPE300 no protegidas, para una resistencia contra el fuego de R60. Estos datos se encuentran resumidos en la siguiente tabla y gráficamente representados en la siguiente figura.</p> <table><tr><th>Time</th><th>Beam</th><th>Mesh</th><th>Slab top</th><th>Slab bottom</th><th>Beam capacity</th><th>Maximum allowable deflection</th><th>Slab yield</th><th>Enhance-ment</th><th>Slab capacity</th><th>Total capacity</th><th>Unity factor</th></tr><tr><th>mins</th><th>°C</th><th>°C</th><th>°C</th><th>°C</th><th>kN/m²</th><th>mm</th><th>kN/m²</th><th></th><th>kN/m²</th><th>kN/m²</th><th></th></tr><tr><td>0</td><td>20</td><td>20</td><td>20</td><td>20</td><td>20.25</td><td>190</td><td>2.66</td><td>1.97</td><td>5.25</td><td>25.50</td><td>0.32</td></tr><tr><td>5</td><td>247</td><td>21</td><td>20</td><td>173</td><td>20.25</td><td>233</td><td>2.66</td><td>2.20</td><td>5.85</td><td>26.11</td><td>0.32</td></tr><tr><td>10</td><td>534</td><td>24</td><td>20</td><td>387</td><td>13.96</td><td>292</td><td>2.66</td><td>2.52</td><td>6.70</td><td>20.66</td><td>0.40</td></tr><tr><td>15</td><td>692</td><td>31</td><td>21</td><td>534</td><td>5.31</td><td>333</td><td>2.66</td><td>2.74</td><td>7.28</td><td>12.59</td><td>0.66</td></tr><tr><td>20</td><td>761</td><td>39</td><td>24</td><td>631</td><td>3.36</td><td>359</td><td>2.66</td><td>2.88</td><td>7.66</td><td>11.01</td><td>0.75</td></tr><tr><td>25</td><td>802</td><td>48</td><td>28</td><td>697</td><td>2.35</td><td>377</td><td>2.66</td><td>2.97</td><td>7.90</td><td>10.25</td><td>0.80</td></tr><tr><td>30</td><td>832</td><td>60</td><td>33</td><td>746</td><td>2.02</td><td>389</td><td>2.66</td><td>3.03</td><td>8.08</td><td>10.10</td><td>0.82</td></tr><tr><td>35</td><td>857</td><td>70</td><td>39</td><td>784</td><td>1.76</td><td>398</td><td>2.66</td><td>3.08</td><td>8.20</td><td>9.96</td><td>0.83</td></tr><tr><td>40</td><td>879</td><td>86</td><td>47</td><td>815</td><td>1.53</td><td>404</td><td>2.66</td><td>3.12</td><td>8.30</td><td>9.82</td><td>0.84</td></tr><tr><td>45</td><td>897</td><td>91</td><td>55</td><td>841</td><td>1.33</td><td>409</td><td>2.66</td><td>3.14</td><td>8.37</td><td>9.70</td><td>0.85</td></tr><tr><td>50</td><td>914</td><td>112</td><td>63</td><td>864</td><td>1.24</td><td>413</td><td>2.66</td><td>3.17</td><td>8.43</td><td>9.67</td><td>0.85</td></tr><tr><td>55</td><td>928</td><td>127</td><td>71</td><td>883</td><td>1.18</td><td>416</td><td>2.66</td><td>3.18</td><td>8.47</td><td>9.65</td><td>0.86</td></tr><tr><td>60</td><td>942</td><td>138</td><td>78</td><td>901</td><td>1.12</td><td>419</td><td>2.66</td><td>3.20</td><td>8.51</td><td>9.63</td><td>0.86</td></tr></table> <p>Maximum unity factor: 0.86 Floor slab adequate</p>														Time	Beam	Mesh	Slab top	Slab bottom	Beam capacity	Maximum allowable deflection	Slab yield	Enhance-ment	Slab capacity	Total capacity	Unity factor	mins	°C	°C	°C	°C	kN/m ²	mm	kN/m ²		kN/m ²	kN/m ²		0	20	20	20	20	20.25	190	2.66	1.97	5.25	25.50	0.32	5	247	21	20	173	20.25	233	2.66	2.20	5.85	26.11	0.32	10	534	24	20	387	13.96	292	2.66	2.52	6.70	20.66	0.40	15	692	31	21	534	5.31	333	2.66	2.74	7.28	12.59	0.66	20	761	39	24	631	3.36	359	2.66	2.88	7.66	11.01	0.75	25	802	48	28	697	2.35	377	2.66	2.97	7.90	10.25	0.80	30	832	60	33	746	2.02	389	2.66	3.03	8.08	10.10	0.82	35	857	70	39	784	1.76	398	2.66	3.08	8.20	9.96	0.83	40	879	86	47	815	1.53	404	2.66	3.12	8.30	9.82	0.84	45	897	91	55	841	1.33	409	2.66	3.14	8.37	9.70	0.85	50	914	112	63	864	1.24	413	2.66	3.17	8.43	9.67	0.85	55	928	127	71	883	1.18	416	2.66	3.18	8.47	9.65	0.86	60	942	138	78	901	1.12	419	2.66	3.20	8.51	9.63	0.86
Time	Beam	Mesh	Slab top	Slab bottom	Beam capacity	Maximum allowable deflection	Slab yield	Enhance-ment	Slab capacity	Total capacity	Unity factor																																																																																																																																																																																						
mins	°C	°C	°C	°C	kN/m ²	mm	kN/m ²		kN/m ²	kN/m ²																																																																																																																																																																																							
0	20	20	20	20	20.25	190	2.66	1.97	5.25	25.50	0.32																																																																																																																																																																																						
5	247	21	20	173	20.25	233	2.66	2.20	5.85	26.11	0.32																																																																																																																																																																																						
10	534	24	20	387	13.96	292	2.66	2.52	6.70	20.66	0.40																																																																																																																																																																																						
15	692	31	21	534	5.31	333	2.66	2.74	7.28	12.59	0.66																																																																																																																																																																																						
20	761	39	24	631	3.36	359	2.66	2.88	7.66	11.01	0.75																																																																																																																																																																																						
25	802	48	28	697	2.35	377	2.66	2.97	7.90	10.25	0.80																																																																																																																																																																																						
30	832	60	33	746	2.02	389	2.66	3.03	8.08	10.10	0.82																																																																																																																																																																																						
35	857	70	39	784	1.76	398	2.66	3.08	8.20	9.96	0.83																																																																																																																																																																																						
40	879	86	47	815	1.53	404	2.66	3.12	8.30	9.82	0.84																																																																																																																																																																																						
45	897	91	55	841	1.33	409	2.66	3.14	8.37	9.70	0.85																																																																																																																																																																																						
50	914	112	63	864	1.24	413	2.66	3.17	8.43	9.67	0.85																																																																																																																																																																																						
55	928	127	71	883	1.18	416	2.66	3.18	8.47	9.65	0.86																																																																																																																																																																																						
60	942	138	78	901	1.12	419	2.66	3.20	8.51	9.63	0.86																																																																																																																																																																																						
<p>En base a los datos presentados en la tabla, y tras 20 minutos de exposición al fuego, la capacidad de la viga es de 3,36 kN/m² < 4,4 kN/m² de la acción en situación de incendio.</p> <p>Considerando la capacidad de la losa, la resistencia total se mantiene por encima de 9 kN/m² tras 60 minutos de exposición al fuego, lo cual significa que la viga no necesita ser protegida.</p>																																																																																																																																																																																																	

Titulo	Ejemplo resuelto – Estrategias de seguridad ante el fuego y proyecto de cálculo para vigas de forjado	10 de 10																																																																																																																																																										
<div><p>The figure consists of two line graphs sharing a common x-axis representing Time in minutes (0 to 60).</p><p>Top Graph: Temperature (°C) vs Time (min)</p><table><tr><th>Time (min)</th><th>Slab Top (°C)</th><th>Slab Bottom (°C)</th><th>Unprotected Beam (°C)</th><th>Mesh (°C)</th><th>Fire (°C)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>5</td><td>10</td><td>150</td><td>250</td><td>10</td><td>550</td></tr><tr><td>10</td><td>20</td><td>350</td><td>550</td><td>20</td><td>650</td></tr><tr><td>15</td><td>30</td><td>550</td><td>750</td><td>30</td><td>700</td></tr><tr><td>20</td><td>40</td><td>650</td><td>800</td><td>40</td><td>750</td></tr><tr><td>25</td><td>50</td><td>700</td><td>820</td><td>50</td><td>780</td></tr><tr><td>30</td><td>60</td><td>750</td><td>840</td><td>60</td><td>800</td></tr><tr><td>35</td><td>70</td><td>780</td><td>860</td><td>70</td><td>820</td></tr><tr><td>40</td><td>80</td><td>800</td><td>880</td><td>80</td><td>840</td></tr><tr><td>45</td><td>90</td><td>820</td><td>900</td><td>90</td><td>860</td></tr><tr><td>50</td><td>100</td><td>840</td><td>910</td><td>100</td><td>880</td></tr><tr><td>55</td><td>110</td><td>860</td><td>920</td><td>110</td><td>900</td></tr><tr><td>60</td><td>120</td><td>880</td><td>930</td><td>120</td><td>920</td></tr></table><p>Bottom Graph: Bending capacity (kN/m²) and Maximum allowable deflection (mm) vs Time (min)</p><table><tr><th>Time (min)</th><th>Slab Capacity (kN/m²)</th><th>Unprotected Beam Capacity (kN/m²)</th><th>Total Capacity (kN/m²)</th><th>Maximum Allowable Deflection (mm)</th></tr><tr><td>0</td><td>5</td><td>20</td><td>25</td><td>150</td></tr><tr><td>5</td><td>6</td><td>20</td><td>26</td><td>200</td></tr><tr><td>10</td><td>7</td><td>15</td><td>22</td><td>250</td></tr><tr><td>15</td><td>8</td><td>5</td><td>13</td><td>300</td></tr><tr><td>20</td><td>8</td><td>3</td><td>11</td><td>330</td></tr><tr><td>25</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>350</td></tr><tr><td>30</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>360</td></tr><tr><td>35</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>370</td></tr><tr><td>40</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>380</td></tr><tr><td>45</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>390</td></tr><tr><td>50</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>400</td></tr><tr><td>55</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>410</td></tr><tr><td>60</td><td>8</td><td>2</td><td>10</td><td>420</td></tr></table></div>			Time (min)	Slab Top (°C)	Slab Bottom (°C)	Unprotected Beam (°C)	Mesh (°C)	Fire (°C)	0	0	0	0	0	0	5	10	150	250	10	550	10	20	350	550	20	650	15	30	550	750	30	700	20	40	650	800	40	750	25	50	700	820	50	780	30	60	750	840	60	800	35	70	780	860	70	820	40	80	800	880	80	840	45	90	820	900	90	860	50	100	840	910	100	880	55	110	860	920	110	900	60	120	880	930	120	920	Time (min)	Slab Capacity (kN/m²)	Unprotected Beam Capacity (kN/m²)	Total Capacity (kN/m²)	Maximum Allowable Deflection (mm)	0	5	20	25	150	5	6	20	26	200	10	7	15	22	250	15	8	5	13	300	20	8	3	11	330	25	8	2	10	350	30	8	2	10	360	35	8	2	10	370	40	8	2	10	380	45	8	2	10	390	50	8	2	10	400	55	8	2	10	410	60	8	2	10	420
Time (min)	Slab Top (°C)	Slab Bottom (°C)	Unprotected Beam (°C)	Mesh (°C)	Fire (°C)																																																																																																																																																							
0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																							
5	10	150	250	10	550																																																																																																																																																							
10	20	350	550	20	650																																																																																																																																																							
15	30	550	750	30	700																																																																																																																																																							
20	40	650	800	40	750																																																																																																																																																							
25	50	700	820	50	780																																																																																																																																																							
30	60	750	840	60	800																																																																																																																																																							
35	70	780	860	70	820																																																																																																																																																							
40	80	800	880	80	840																																																																																																																																																							
45	90	820	900	90	860																																																																																																																																																							
50	100	840	910	100	880																																																																																																																																																							
55	110	860	920	110	900																																																																																																																																																							
60	120	880	930	120	920																																																																																																																																																							
Time (min)	Slab Capacity (kN/m²)	Unprotected Beam Capacity (kN/m²)	Total Capacity (kN/m²)	Maximum Allowable Deflection (mm)																																																																																																																																																								
0	5	20	25	150																																																																																																																																																								
5	6	20	26	200																																																																																																																																																								
10	7	15	22	250																																																																																																																																																								
15	8	5	13	300																																																																																																																																																								
20	8	3	11	330																																																																																																																																																								
25	8	2	10	350																																																																																																																																																								
30	8	2	10	360																																																																																																																																																								
35	8	2	10	370																																																																																																																																																								
40	8	2	10	380																																																																																																																																																								
45	8	2	10	390																																																																																																																																																								
50	8	2	10	400																																																																																																																																																								
55	8	2	10	410																																																																																																																																																								
60	8	2	10	420																																																																																																																																																								