

STEEL BUILDINGS IN EUROPE

**Edificios de acero de una sola
planta**

Parte 7: Ingeniería de fuego

**Edificios de acero de una sola
planta**

Parte 7: Ingeniería de fuego

PRÓLOGO

Esta publicación es la séptima parte de la guía de diseño para edificios de acero de una sola planta (en inglés, *Single-Storey Steel Buildings*).

Las 11 Partes en que se divide la guía *Edificios de Acero de una sola planta* son:

- Parte 1: Guía del arquitecto
- Parte 2: Diseño conceptual
- Parte 3: Acciones
- Parte 4: Diseño detallado de pórticos
- Parte 5: Diseño detallado de celosías
- Parte 6: Diseño detallado de pilares compuestos
- Parte 7: Ingeniería de fuego
- Parte 8: Cerramiento
- Parte 9: Introducción a herramientas informáticas
- Parte 10: Guía de prescripciones técnicas del proyecto
- Parte 11: Uniones resistentes a momentos

Edificios de acero de una sola planta, es una de las dos guías de diseño publicadas. La segunda guía se titula *Edificios de acero de varias plantas* (en inglés, *Multi-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 ArcelorMittal, Peiner Träger y Corus. El contenido técnico ha sido elaborado por CTICM y SCI, colaboradores de Steel Alliance.

Índice

	Página Nº
PRÓLOGO	iii
RESUMEN	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
2 RIESGOS DEL INCENDIO EN EDIFICIOS DE UNA SOLA PLANTA	3
2.1 Objetivos de seguridad en caso de incendio	3
2.2 Análisis de los riesgos de incendio	3
2.3 Principales requisitos de la normativa actual contra incendios	5
3 OPCIONES PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DE FUEGO EN LOS EUROCÓDIGOS	7
3.1 Enfoques actuales de diseño	7
3.2 Análisis del incendio	8
3.3 Análisis de la transferencia de calor	9
3.4 Análisis estructural	9
4 GUÍA SOBRE LAS SOLUCIONES ADECUADAS DE INGENIERÍA DE FUEGO	12
4.1 Campo de aplicación de los distintos métodos de cálculo	12
4.2 Elección del enfoque de cálculo óptimo	13
5 USO DIRECTO DE OPCIONES SIMPLES DE INGENIERÍA PARA NO ESPECIALISTAS	15
5.1 Modelos de fuego	15
5.2 Modelos térmicos	19
5.3 Modelos estructurales	24
5.4 Normas de diseño específicas para edificios de una sola planta	35
5.5 Métodos simplificados de cálculo	37
5.6 Recomendaciones de diseño	42
6 GUÍA SOBRE EL USO DE SOLUCIONES MÁS AVANZADAS	53
6.1 Modelos de fuego	53
6.2 Modelos térmicos	56
6.3 Modelos estructurales	58
REFERENCIAS	63
APÉNDICE A Procedimiento alemán de seguridad ante incendio para edificios de una sola planta industriales y comerciales	64

RESUMEN

En este documento se ofrece una orientación para el diseño al fuego de estructuras de edificios de acero de una sola planta. Contiene información detallada que permite a los ingenieros y proyectistas familiarizarse con los actuales enfoques de diseño y modelos de cálculo, que se pueden aplicar no sólo para cumplir los requisitos prescriptivos, sino también para realizar el diseño de la seguridad en caso de incendio basado en prestaciones. Los métodos de cálculo que se presentan en esta guía, que van desde normas de diseño sencillas a modelos de cálculo más sofisticados, derivan de la EN 1993-1-2 y la 1994-1-2. Incluyen tanto estructuras de acero como estructuras mixtas (sin protección adicional o protegidas). Además se presentan algunos métodos de cálculo específicos, permitiendo una verificación simplificada para comprobar si el comportamiento de la estructura de acero en naves industriales, para una situación de incendio determinada, cumple los objetivos de seguridad en base a los requisitos de un diseño basado en prestaciones.

1 INTRODUCCIÓN

Gracias a las particularidades de los edificios de una sola planta, se puede cumplir el objetivo de seguridad de las personas en el caso de producirse un incendio, sin necesidad de una resistencia al fuego onerosa para la estructura. No obstante se han de tener en cuenta otros objetivos de seguridad en el caso que sea posible aceptar el colapso de estos edificios o de parte de ellos. Debido a estas razones, gran cantidad de los reglamentos europeos de seguridad en caso de incendio en edificios están avanzando hacia la aceptación de cálculos alternativos de ingeniería de seguridad ante incendios. Las normas prescriptivas podrán entonces ser sustituidas por requisitos basados en prestaciones, tales como el comportamiento adecuado de la estructura ante el incendio, que pretende satisfacer los objetivos de seguridad, entre los que se incluyen la seguridad de la vida de las personas (ocupantes y bomberos), la protección del medio ambiente, la protección de la propiedad y la continuidad del negocio. Ya se han demostrado sobradamente las ventajas y la aplicación correcta del enfoque del diseño basado en prestaciones para la seguridad en caso de incendio en edificios de una sola planta, especialmente en aquellos casos en los que se requería resistencia al fuego, permitiendo en algunos casos la adopción de soluciones más innovadoras, más seguras y más eficientes desde el punto de vista del coste.

Para contribuir al cálculo estructural del edificio, en lo que se refiere al fuego, se ha creado una nueva serie de normas europeas, los Eurocódigos. Las partes correspondientes de los Eurocódigos para el diseño a fuego de un edificio de una sola planta son la EN 1991-1-2^[1] (que contiene los conceptos y normas principales necesarios para la descripción de las acciones térmicas y mecánicas sobre las estructuras expuestas al fuego) y las partes relativas al material – Eurocódigos específicos que hacen referencia al cálculo de estructuras con respecto al fuego, como la EN 1993-1-2^[2], relacionada con las estructuras de acero y la EN 1994-1-2^[3] relacionada con las estructuras mixtas de acero y hormigón.

Las partes de los Eurocódigos relacionadas con el fuego ofrecen una amplia gama de métodos de cálculo. Permiten a los ingenieros seguir un enfoque prescriptivo para cumplir con los requisitos de seguridad en caso de incendio según se especifique en la reglamentación nacional de construcción, o basarse en las reglas del diseño prestacional para llevar a cabo un diseño de ingeniería de seguridad ante incendios. Éste implica generalmente un análisis más complejo de tipo computacional, proporcionando unos resultados más precisos respecto de los objetivos de seguridad en caso incendio.

La presente guía ofrece una panorámica general de los métodos actuales de cálculo que están disponibles para la evaluación del comportamiento del fuego en edificios de una sola planta con estructura de acero o mixta, así como sus ámbitos de aplicación. Se tratan los métodos simplificados de cálculo, de fácil utilización, y los modelos de cálculo más avanzados. Además, para permitir una evaluación rápida, se dan unas reglas de cálculo sencillas para decidir rápidamente si el comportamiento estructural de las estructuras de acero de almacenes y naves industriales, cumple los objetivos de seguridad en caso de

incendio requeridos por la normativa de seguridad en caso de incendio de edificios industriales.

Con esta guía se pretende ayudar al ingeniero a comprender con mayor claridad las diferentes metodologías de cálculo y llevar a cabo el diseño con respecto al fuego de un edificio de una sola planta de conformidad con los Eurocódigos, partiendo de un análisis relativamente sencillo de elementos individuales en condiciones estándar de fuego, hacia un análisis más complejo en condiciones reales de fuego.

2 RIESGOS DEL INCENDIO EN EDIFICIOS DE UNA SOLA PLANTA

2.1 Objetivos de seguridad en caso de incendio

El principal objetivo de la mayor parte de la normativa para la seguridad en caso de incendio consiste en garantizar la protección de vidas (de las personas que ocupan el edificio y de los bomberos), proteger el entorno y hasta cierto punto, también los bienes materiales (el contenido del edificio y el mismo edificio en sí). Por medio de un conjunto de medidas que incluyen sistemas activos y pasivos de protección contra incendios, los objetivos son los siguientes:

- Reducir y evitar la aparición del fuego a través del control de los riesgos de incendio en el edificio.
- Proporcionar recorridos de evacuación seguros para evacuar a los ocupantes del edificio.
- Evitar la propagación del incendio desde un sector de incendio a otras partes del edificio y a los edificios colindantes.
- Garantizar que el edificio sigue siendo estable desde el punto de vista estructural durante un período de tiempo suficiente para la evacuación de los ocupantes y para que los bomberos puedan rescatar a los ocupantes, en caso de ser necesario.

2.2 Análisis de los riesgos de incendio

Los edificios de una sola planta como fábricas, almacenes o centros comerciales constituyen un tipo de construcción de acero común hoy en día. En el caso concreto de los almacenes, en función de la distribución del almacenamiento (incluido almacenamiento autónomo, almacenamiento en racks, palés o en estantes sólidos o de listones) y de la combustibilidad de los materiales que se almacenen, el fuego puede desarrollarse rápidamente y poner en peligro a los ocupantes mucho antes que se produzca el colapso estructural del edificio. De hecho, el crecimiento del fuego puede ser muy importante, de la misma manera que la propagación de las llamas suele ser muy rápido. Los huecos verticales y horizontales que se forman entre los palés adyacentes y los racks funcionan como chimeneas, lo que aumenta la propagación de las llamas hacia el tejado. El humo forma rápidamente una capa caliente bajo la cubierta y luego desciende progresivamente a medida que se va desarrollando el incendio. Evidentemente, la velocidad a la que esto sucede varía en función de los contenidos de combustible y de la disposición del edificio. En condiciones de poca ventilación, los edificios de una sola planta pueden llenarse de humo en cuestión de pocos minutos. A pesar que el humo está compuesto principalmente por aire en convección, contiene la cantidad suficiente de sustancias tóxicas como para asfixiar, dar lugar a una indisposición o matar en cuestión de minutos a las personas expuestas a ellas. Además, la capa de humo caliente también irradiará un fuerte flujo de calor a las personas que escapen de la zona del fuego. Una capa de gas caliente a 500 °C implica un flujo de calor

de alrededor de 20 kW/m^2 (que corresponde a la energía de radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura de 500°C) y, en esas condiciones térmicas, tras el paso de tan sólo unos segundos, se producirán quemaduras en la piel^[4]. En términos generales, el umbral admisible que suele darse por bueno es de $2,5 \text{ kW/m}^2$, muy por debajo del flujo de calor necesario para desembocar en el fallo de los elementos estructurales. Por consiguiente, los edificios perdurarán más que los ocupantes y el colapso estructural de las estructuras de acero de los edificios de una sola planta por lo general no constituye una amenaza adicional para las personas que escapan del área del incendio.

En lo que a las operaciones del servicio de incendios se refiere, se asume como habitual que los bomberos no deben entrar en un edificio de una sola planta cuando haya un fuego que crezca rápidamente. Normalmente, se verán forzados a luchar contra el fuego desde el exterior, mojando los muros colindantes con agua. En este caso, el riesgo para los bomberos se reduce a cero en caso de colapso estructural, ya que se da a un nivel de temperatura que los bomberos no pueden soportar (siempre y cuando no se den ni un colapso progresivo, en el caso de edificios compartimentados, ni un colapso de la estructura hacia afuera^[5,6]). En caso que sea necesaria su entrada en el inicio del incendio para rescatar a alguna persona, no podrán permanecer dentro del edificio si se alcanza un flujo de calor superior a 7 kW/m^2 , situación que se también se encuentra muy alejada de la del riesgo de colapso de la estructura.

Por ello, no resulta necesario aumentar la resistencia al fuego intrínseca de los edificios de una sola planta. Sin embargo, se tiene que considerar de forma precisa la estabilidad general de la estructura y la estabilidad de los elementos de compartimentación, con el fin de evitar cualquier tipo de colapso progresivo. Un edificio de una sola planta sufre colapso progresivo cuando el fallo local de la parte caliente de la estructura desemboca en el fallo de las estructuras frías adyacentes. Además, con el fin de proporcionar una situación de seguridad para los bomberos que se encuentren en las proximidades del edificio, la estructura de los edificios de una sola planta (incluidos los elementos de la fachada) debe colapsar hacia el interior del edificio.

Son numerosas las normativas nacionales que han tenido en cuenta las indicaciones anteriores para edificios de una sola planta industriales así como para edificios públicos, no exigiendo ninguna calificación de resistencia al fuego para dichas construcciones, sino introduciendo requisitos específicos de seguridad en cuanto al comportamiento estructural general y centrando los requisitos en las instalaciones de salida y la temprana detección y/o extinción del incendio.

En lo que a otros edificios de una sola planta se refiere, con cargas de fuego relativamente bajas, el riesgo para la vida en caso de incendio se reduce pues la salida de los ocupantes y las operaciones contra el fuego son fáciles y claras.

2.3 Principales requisitos de la normativa actual contra incendios

2.3.1 Resistencia al fuego de los elementos estructurales

A pesar de los comentarios anteriores, la estructura de los edificios de una sola planta requiere en ocasiones una clase de resistencia al fuego^[7].

La resistencia al fuego se expresa como el tiempo durante el que el elemento de un edificio puede soportar la exposición al fuego sin perder su función (elementos portantes de carga o elementos de partición). Normalmente, los elementos de edificios se clasifican mediante tres criterios de comportamiento:

- La capacidad portante R , que es la capacidad de resistencia al fuego de un elemento de carga portante sin perder su estabilidad estructural.
- La integridad E , que es la capacidad de un elemento de partición de evitar el paso a través de él de llamas y gases calientes cuando se ve expuesto al fuego por un lado.
- El aislamiento I , es la capacidad de un elemento de partición, cuando se ve expuesto al fuego en un lado, de restringir el aumento de temperatura del lado que no está expuesto por debajo de los límites especificados (por lo general, un valor medio de 140°C).

En la normativa prescriptiva contra incendios, la resistencia al fuego requerida para el elemento de un edificio se expresa como el período de tiempo mínimo durante el que el elemento del edificio funcionaría de manera satisfactoria cuando está sometido al fuego estándar.

Cuando se establecen requisitos de estabilidad para los edificios de una sola planta, suelen estar entre 15 (R15) y 60 minutos (R60), en función de la clase de ocupación del edificio, la existencia de rociadores, la altura del edificio y el tamaño del recinto.

2.3.2 Compartimentación y separación del edificio

Los edificios de una sola planta deben subdividirse en recintos separados por elementos de compartimentación cuando la superficie del edificio es superior al tamaño de recinto máximo permitido. Los límites en cuanto al tamaño del recinto pueden superarse si se instalan rociadores en el edificio.

Los efectos sobre la pérdida de bienes, en caso que haya compartimentación, consisten en que el daño directo se limita al contenido del recinto en el que se inicia el fuego, reduciendo las posibilidades que el fuego crezca. En cuanto a la salvaguarda de vidas, las personas que se hallen en otras partes del edificio pueden valerse de las vías de evacuación para salir del edificio de forma segura sin exponerse al humo ni a los gases del fuego.

A la hora de considerar los elementos de compartimentación entre los recintos, la resistencia al fuego suele estar entre REI 60 y REI 120.

También es necesario evitar que el fuego se propague a los edificios colindantes. Esto se consigue normalmente cuando existe la distancia suficiente o elementos de fachada con una resistencia al fuego adecuada. En el proyecto de investigación francés “Flumilog”, se ha desarrollado un método de cálculo

para evaluar los efectos radiantes térmicos de los fuegos en edificios de almacenamiento de una sola planta. El método permite calcular las distancias seguras de separación, teniendo en cuenta las principales características del edificio, como por ejemplo, el contenido del edificio, tipo de elementos de fachada y de cubierta, etc.

2.3.3 Extinción del incendio

Los reglamentos nacionales pueden requerir el uso de rociadores. Además de su efecto obvio sobre la reducción del crecimiento del incendio, su utilización normalmente permite la reducción de la clasificación de resistencia al fuego de la estructura. Asimismo permiten el uso de mayores sectores de incendio.

2.3.4 Sistemas de control del humo

Las normativas nacionales de protección contra incendios, de ámbito nacional, pueden exigir la existencia de sistemas de control del humo en los edificios públicos, en los edificios de almacenamiento y en los edificios industriales con el fin de facilitar la salida, ya que se minimizan los riesgos de inhalación de humo y de lesiones, permitiendo hasta cierto punto a los bomberos ver mejor el fuego y así extinguirlo de forma más rápida y eficaz. Los sistemas de control del humo ayudan a eliminar el humo del área del incendio y a limitar la propagación de gas caliente por debajo de la cubierta, lo que aumenta el tiempo hasta que el recinto se llene de humo, ofreciendo así a las personas más tiempo para evacuar de manera segura el edificio. Esto puede conseguirse combinando sistemas de evacuación de humo (mecánicos o naturales) y pantallas (que contienen al humo en zonas concretas).

2.3.5 Detección del fuego y alarmas anti-incendios

Si se desea detectar la aparición de fuego y alertar a los ocupantes del edificio y a los bomberos de la existencia de fuego, será preciso tomar una serie de medidas que resulten adecuadas. En los edificios pequeños de una sola planta en los que todas las salidas son visibles, es muy probable que cualquier fuego sea detectado con rapidez por los ocupantes y que con una voz de “¡Fuego!” sea suficiente. En los edificios de una sola planta de mayor dimensión, un receptor acústico, como por ejemplo, una alarma provista de una batería, o una campana pueden resultar adecuados. En el caso de un edificio industrial, es necesario tener en cuenta el ruido ambiental ya que hay que asegurarse que los ocupantes oigan la alarma.

2.3.6 Instalaciones de salida

Para una evacuación segura, se precisan los medios de evacuación adecuados, como por ejemplo, un número adecuado de salidas de emergencia, que éstas tengan la anchura adecuada, así como pasillos y accesos de evacuación con la longitud, anchura y altura adecuadas. Por lo general, las vías de evacuación en los edificios pequeños de una sola planta conducen directamente a una ubicación segura en el exterior del edificio y no suelen precisar ningún tratamiento especial. En el caso de los edificios más grandes, donde las distancias que hay que recorrer son mayores y donde es probable que el fuego inhabilite las vías de evacuación, será preciso encontrar medios de evacuación alternativos. Asimismo es preciso tener en cuenta a las personas discapacitadas.

3 OPCIONES PRÁCTICAS DE INGENIERÍA DE FUEGO EN LOS EUROCÓDIGOS

3.1 Enfoques actuales de diseño

Utilizando las partes relacionadas con el fuego en los Eurocódigos^[8,9], los edificios de una sola planta pueden diseñarse a través del enfoque prescriptivo o bien a través del enfoque de diseño basado en prestaciones mediante la aplicación de los principios de ingeniería de seguridad ante incendios^[10].

El enfoque prescriptivo se suele aplicar principalmente en cumplimiento de los requisitos estándar de resistencia al fuego que se establecen en las normativas de protección contra incendios de ámbito nacional. Ofrece un nivel de seguridad que es relativamente fácil de conseguir y poner en práctica. Sin embargo, puede resultar algo conservador, ya que precisa el uso de una cantidad nada despreciable de protección contra el fuego para alcanzar la clasificación de resistencia al fuego requerida. Este enfoque suele llevarse a cabo cuando se diseñan edificios y estructuras relativamente sencillos.

Como una solución alternativa o cuando las normas nacionales lo permitan, el enfoque basado en prestaciones puede permitir la evaluación de las medidas adecuadas para cumplir una serie de objetivos predeterminados de seguridad en caso de incendio, como los indicados en el apartado 2.1, y los criterios de prestaciones correspondientes. A través de la ingeniería estructural a fuego, los ingenieros pueden evaluar la resistencia al fuego necesaria que precisa una estructura con el fin de evitar la propagación del fuego y evitar así un colapso estructural prematuro. En lo que respecta a los edificios de una sola planta, la estructura principal podría diseñarse de tal forma que continuase siendo estable en condiciones de exposición al fuego durante el tiempo suficiente para que los ocupantes puedan salir de él. Un enfoque de este tipo tiene en cuenta la severidad de la exposición al fuego, haciendo cálculos adecuados de las cargas de fuego reales y de los parámetros de desarrollo del incendio, que pueden calcularse teniendo en cuenta la actividad del edificio.

El enfoque basado en prestaciones proporciona cierta flexibilidad a la hora de decantarse por las soluciones técnicas que cumplan los objetivos de seguridad en caso de incendio, pero normalmente requiere el uso de herramientas de diseño sofisticadas. Los ingenieros y proyectistas que sigan modelos de cálculo avanzado tienen que contar con la formación necesaria para utilizarlos y saber cuáles son sus límites. Ya que la ingeniería de seguridad ante incendios permite obtener diseños muy eficientes, con una capacidad de reserva mínima, es necesario que se lleve a cabo por usuarios experimentados para asegurar que se utilicen los modelos adecuados.

En aquellos casos en los que las normas nacionales contra el fuego permitan el enfoque basado en prestaciones, es posible que las entidades reguladoras exijan que el diseño al fuego sea verificado por un tercero.

El rendimiento ante el fuego de una estructura en su conjunto o una parte de la misma, se lleva a cabo siguiendo, en el caso de una situación de cálculo de fuego concreta, tres etapas sucesivas en la ingeniería estructural al fuego^[1].

- Análisis del incendio. Cálculo de las acciones térmicas/exposición – Modelos de fuego.
- Análisis térmico. Cálculo de la velocidad de calentamiento y de las temperaturas de los elementos estructurales – Modelos térmicos.
- Análisis estructural. Cálculo de la respuesta mecánica de los elementos estructurales – Modelos estructurales.

Más abajo se describen brevemente los métodos de diseño existentes a la hora de evaluar el comportamiento al fuego de la estructura. Estos métodos van desde cálculos sencillos hechos a mano hasta el uso de sofisticados modelos computacionales. La complejidad general del diseño de la seguridad en caso de incendio dependerá de las premisas y los métodos que se adopten a la hora de predecir cada uno de las tres etapas de diseño.

3.2 Análisis del incendio

El objetivo principal de la modelización del desarrollo del incendio consiste en simular el desarrollo del mismo y predecir las acciones térmicas (temperatura del gas, flujo de calor) en los elementos estructurales (con el fin de determinar, en un segundo paso, la temperatura de los elementos estructurales).

A pesar que en la práctica habitual se suele representar un fuego mediante una curva estándar de fuego, el diseño estructural del fuego puede basarse en un diseño que proporcione condiciones más realistas en el recinto del incendio. De esta manera, se tienen en cuenta parámetros tales como la magnitud de la carga de fuego, la velocidad de generación de calor y el factor de ventilación, que desempeñan un papel importante en la severidad del incendio. Además, identificar los escenarios de incendio correspondientes y realistas es un aspecto fundamental en el cálculo de la seguridad en caso de incendio. Hay que deducir los escenarios de incendio de cálculo que se emplearán para analizar el fuego en un edificio a partir de todos los posibles escenarios de incendio. En la mayor parte de los edificios, la cantidad de escenarios de incendio posibles es infinita y tendrá que limitarse. Sólo habrá que estudiar los escenarios de incendio que resulten ser el “peor caso creíble”. Una vez seleccionados los escenarios de incendio de cálculo, existen varios modelos de fuego para evaluar la severidad del incendio y calcular las acciones térmicas correspondientes.

A cada etapa del desarrollo del incendio le corresponde un modelo distinto de fuego. Cuando se inicia un incendio, se localiza dentro de un recinto y en función de las características del recinto y de la carga de fuego, puede permanecer localizado en él o convertirse en un fuego generalizado totalmente desarrollado extendiéndose a todo el recinto. En el caso de recintos pequeños o recintos con aberturas de ventilación pequeñas en comparación con el tamaño del recinto, el fuego se convierte en un fuego totalmente desarrollado.

Tal y como se muestra en la Tabla 3.1, existen tres tipos de modelos para describir fuegos localizados y totalmente desarrollados.

Tabla 3.1 Tipos de modelo de fuego

Tipos de modelo	Fuego localizado	Fuego generalizado
Modelo simplificado	Modelo Hasemi Modelo Heskestad	Fuego paramétrico
Modelos de zona	Modelo de dos zonas	Modelo de una zona
Modelo de campo	CFD	CFD

Los modelos simplificados, generalmente son modelos empíricos basados en suposiciones convencionales. Los modelos de zona tienen en cuenta los principales parámetros que controlan el fuego, pero introducen suposiciones simplificadas que limitan el campo de aplicación. Se podrían utilizar en recintos con geometrías simples y fáciles de definir. Los modelos de campo son más precisos pero resultan bastante complejos como herramienta de cálculo general; se podrían utilizar en recintos con geometrías complejas o con techos altos e irregulares.

Las condiciones de uso se describen brevemente en el capítulo 6.

3.3 Análisis de la transferencia de calor

Una vez calculadas las acciones térmicas, es preciso calcular la transferencia térmica a los elementos estructurales. Los modelos térmicos que se utilizarán deberían basarse en los principios aceptados y en las suposiciones de la teoría de transferencia de calor.

Se pueden utilizar distintos modelos en función de las suposiciones y necesidades concretas. En los modelos térmicos, existen unas reglas analíticas que permiten obtener una aproximación de la temperatura uniforme en la sección transversal, principalmente en el caso de elementos de acero. También existen métodos de cálculo avanzado que se basan en elementos finitos o en el método de las diferencias finitas, y que permiten determinar la distribución 2D o 3D de temperaturas en los elementos estructurales (en la sección transversal y longitudinalmente). Los modelos avanzados resultan de aplicación a cualquier tipo de análisis de elementos estructurales en el cálculo al fuego.

Los modelos térmicos se describirán brevemente en los siguientes apartados.

3.4 Análisis estructural

Partiendo del campo de temperaturas obtenido previamente para los elementos estructurales y de la combinación de cargas de acciones mecánicas en caso de incendio, es posible evaluar el comportamiento estructural siguiendo uno de los tres posibles enfoques:

- Análisis de elementos, en el que cada elemento de la estructura se evaluará considerándolo totalmente independiente del resto de los elementos. La condición de la unión a otros elementos será sustituida por las condiciones de contorno adecuadas.
- Análisis de partes de la estructura, en el que una parte de la estructura se considerará directamente a la hora de efectuar la evaluación, mediante el

uso de las condiciones de contorno adecuadas para reflejar su conexión con otras partes de la estructura.

- Análisis global de la estructura, en el que la totalidad de la estructura formará parte de la evaluación.

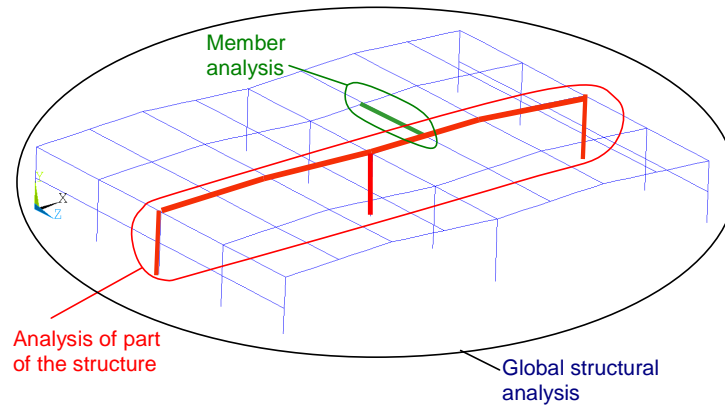


Figura 3.1 Diferentes enfoques de cálculo para la respuesta mecánica de la estructura en caso de incendio

El análisis de elementos es fácil de utilizar, en particular mediante los métodos simplificados de cálculo y por esa razón es el que más se usa en situaciones de fuego normalizado. El análisis de la totalidad de la estructura o de sus partes tiene en cuenta al menos varios elementos estructurales conjuntamente, de forma que se trata directamente el efecto de interacción entre ellos. Así, se puede considerar de forma precisa la redistribución de la carga de las partes calientes (debilitadas en el interior del recinto del incendio) a las partes frías (más resistentes en el exterior del compartimento de incendio), consiguiéndose gracias al análisis global, una mejor visión del comportamiento general de la estructura en una situación de incendio.

Según los Eurocódigos, existen tres tipos de métodos de cálculo para evaluar el comportamiento mecánico de las estructuras en una situación de incendio en los distintos enfoques de cálculo mencionados anteriormente. El cálculo al fuego se puede llevar a cabo por medio de:

- Un método de cálculo simple, basado en datos tabulados predefinidos, tal y como se indica en la norma EN 1994-1-2^[3]. Este método sólo resulta de aplicación a las estructuras mixtas de acero y hormigón. Las tablas se han evaluado a partir de modelos numéricos y ensayos sobre tipos básicos de estructuras, como por ejemplo, losas, vigas y pilares, para determinados tiempos de resistencia al fuego, para calentamiento en función de la curva de fuego normalizado y para un nivel de carga definido. Las tablas son fáciles de usar y fiables, pero sólo abarcan un rango limitado de secciones tipo.
- Modelos de cálculo simplificado. Este tipo de método de cálculo puede dividirse en dos familias distintas. La primera es el método de la temperatura crítica, de amplia aplicación en el análisis de elementos estructurales de acero. La segunda es el uso de modelos mecánicos simples (comprobación en el dominio de la resistencia) desarrollados para el análisis de elementos estructurales de acero y mixtos. Se han desarrollado

modelos para los elementos estructurales estándar como losas, vigas y pilares.

- Modelos de cálculo avanzado. Este tipo de método de diseño puede aplicarse a todo tipo de estructuras y los modelos están basados, por lo general, en el método de los elementos finitos o en el método de las diferencias finitas. Ofrecen un análisis realista de las estructuras. Los resultados del análisis suelen obtenerse generalmente en forma de deformaciones de la estructura durante la totalidad del período del incendio.

Los modelos estructurales se describirán brevemente en los siguientes apartados.

4 GUÍA SOBRE LAS SOLUCIONES ADECUADAS DE INGENIERÍA DE FUEGO

4.1 Campo de aplicación de los distintos métodos de cálculo

En la siguiente tabla se indica el campo de aplicación de los métodos disponibles de cálculo con respecto al fuego, considerando tanto el cálculo en función de los requisitos prescriptivos basados en el fuego estándar normalizado, así como el cálculo al fuego basado en prestaciones.^[11]

Tabla 4.1 Campo de aplicación de los distintos métodos de cálculo

Enfoque	Herramientas	Acciones térmicas	Modelización térmica	Modelización estructural
Enfoque prescriptivo (cálculo con fuego estándar)	Datos previamente obtenidos por medio de ensayos estándar al fuego (Datos de fabricantes)	Curva estándar ISO EN 1991-1-2		
	Datos tabulados del EN 1994-1-2			
	Módelos de cálculo simplificado de los Eurocódigos		Acero EN 1993-1-2 §4.2.5	Acero EN 1993-1-2 §4.2.3 §4.2.4
	Modelos de cálculo avanzado		Mixtas acero-hormigón EN 1994-1-2 §4.3	
			Acero y mixtas acero-hormigón	
			MEF* o MDF**	MEF*
Enfoque basado en prestaciones (cálculo con fuego natural)	Módelos de cálculo simplificado	Fuego totalmente desarrollado (Fuego paramétrico, curva estándar ISO***) Fuego localizado	Acero EN 1993-1-2 §4.2.5	Acero EN 1993-1-2 §4.2.3 §4.2.4 Reglas específicas basadas en fuegos totalmente desarrollados §5.4
	Modelos de cálculo avanzado	Modelos de zona	Acero y mixtas acero-hormigón	
		Modelos de campo	FEA* or FDA**	FEA*

*MEF: Método de elementos finitos

**MDF: Método de las diferencias finitas

*** El colapso de edificios de una sola planta suele ocurrir cuando la estructura del edificio (una parte de la misma o la estructura en su totalidad) se ve envuelta totalmente por el fuego. En

una situación de fuego de ese calibre, como el aumento de la temperatura del gas no tiene un efecto significativo en el modo de fallo de la estructura del edificio, resulta adecuado utilizar un enfoque basado en prestaciones que tenga en cuenta las acciones térmicas a partir de la curva de fuego estándar, para investigar el comportamiento al fuego en edificios de una sola planta. Este enfoque puede ser empleado para demostrar el colapso no progresivo y el fallo de la estructura del edificio hacia el interior.

4.2 Elección del enfoque de cálculo óptimo

La elección del enfoque de cálculo depende del tipo de edificio (edificio de almacenamiento, edificio industrial, comercial, etc...), los requisitos especificados en las normas contra el fuego, de ámbito nacional, y la aceptación o el rechazo por las autoridades reguladoras de la posibilidad de aplicar un enfoque basado en prestaciones como alternativa a las normas prescriptivas.

A continuación se indica una serie de sugerencias a la hora de elegir el enfoque de diseño al fuego.

Dada la disparidad de los requisitos, el primer paso -y el más importante- consiste en dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la clasificación de resistencia al fuego requerida, de haberla?
- ¿Es posible llevar a cabo un enfoque basado en prestaciones?

Cuando hay que utilizar un enfoque prescriptivo (en referencia al cálculo al fuego estándar):

- Puede resultar conveniente utilizar modelos de cálculo simplificado cuando se requiera una clasificación de resistencia al fuego baja (R15 o R30) para los elementos estructurales.
- Deben utilizarse modelos de cálculo avanzado cuando los elementos estructurales no sean contemplados por los modelos de cálculo simplificado. También pueden utilizarse con ciertas ventajas económicas para la estructura de acero, cuando sea necesaria una clasificación de resistencia al fuego (por encima de R60), reduciendo el espesor de protección contra el fuego de los elementos de acero.

Cuando las autoridades reguladoras acepten el enfoque basado en prestaciones y se precise una estabilidad estructural:

- Un enfoque basado en prestaciones puede resultar a todas luces beneficioso cuando la estructura no sea muy habitual y no se recoja adecuadamente en los métodos prescriptivos tradicionales.
- Puede ser necesaria una protección contra el fuego localizada, teniendo en cuenta el comportamiento de toda la estructura en un incendio real, con el fin de garantizar la salvaguarda adecuada de los ocupantes del edificio y de los bomberos.

Las normativas nacionales de seguridad en caso de incendio, pueden exigir el uso del enfoque basado en prestaciones para los edificios de una sola planta con importantes riesgos de incendio (cargas elevadas de fuego).

Las normativas nacionales de seguridad en caso de incendio, pueden permitir un cálculo de seguridad al fuego basado en prestaciones que contenga reglas simples y recomendaciones de diseño para los edificios de una sola planta. Dichos enfoques se indican en el apartado 5.4 y en el Anexo A. Se incluyen referencias a otras guías de diseño, así como recomendaciones^[12].

Las medidas activas de protección contra incendios (instalación de rociadores, detectores de incendio, alarmas anti-incendios, sistemas de evacuación del humo) y las pasivas (compartimentación, instalaciones de salida, etc.), suelen ponerse en práctica en los edificios de conformidad con los requisitos de la normativa nacional contra el fuego.

5 USO DIRECTO DE OPCIONES SIMPLES DE INGENIERÍA PARA NO ESPECIALISTAS

En este capítulo se ofrece una descripción general de reglas de diseño de cálculo “sencillas”, fáciles y actuales, para evaluar la resistencia al fuego de elementos estructurales de acero y mixtos de acero-hormigón.

Se indican reglas de diseño sencillas y específicas, así como recomendaciones para cumplir los requisitos de seguridad específicos en cuanto al comportamiento estructural, que se han introducido hace poco en la normativa en materia de seguridad en caso de incendio de muchos países europeos para edificios de una sola planta de almacenamiento e industriales. Es preciso recordar que estos métodos también resultan de aplicación para otros tipos de edificios de una sola planta.

5.1 Modelos de fuego

5.1.1 Curvas nominales de tiempo-temperatura

La norma EN 1991-1-2^[1] proporciona tres curvas de fuego nominal y define las relaciones tiempo-temperatura de un gas arbitrario caliente, en las que no se tienen en cuenta los parámetros físicos de la carga de fuego ni del recinto de incendio. Las relaciones utilizadas con más frecuencia a la hora de diseñar un edificio y también en las prescripciones reguladoras, es la curva normalizada tiempo-temperatura (*fuego estándar ISO*), que representa un recinto de incendio con un fuego totalmente desarrollado. La segunda curva, la curva de fuego exterior, está pensada para los elementos de la fachada, y la tercera es la curva de fuego de hidrocarburos, que representa un fuego con hidrocarburos o un combustible de tipo líquido.

Las curvas nominales tiempo-temperatura se definen de la siguiente manera:

- En el caso de la curva estándar tiempo-temperatura (*fuego estándar ISO*):

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

- En el caso de la curva de fuego exterior:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2)$$

- En el caso de la curva de fuego de hidrocarburos:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

donde:

θ_g es la temperatura del gas en el recinto de incendio [°C]

t es el tiempo [min.]

Es importante tener en cuenta que las curvas indicadas son curvas ilustrativas. No representan el efecto térmico real de un incendio. Las temperaturas indicadas por estas curvas siempre aumentan con el tiempo, sin tener en cuenta

la carga de fuego limitada. La clasificación estándar de resistencia al fuego requerida por los elementos estructurales (expresada como tiempo) no indica, por lo tanto, el tiempo real durante el que sobrevivirán en un edificio en llamas.

5.1.2 Fuego paramétrico

Los modelos de fuego paramétrico proporcionan un método de cálculo bastante sencillo para calcular la temperatura del gas en el recinto de incendio y tienen en cuenta, de manera simplificada, los principales parámetros que influyen en el desarrollo del incendio, tales como el tamaño del recinto, la carga de fuego (que corresponde a la masa de materiales combustibles en el compartimento de incendio), las condiciones de ventilación (aberturas) y las propiedades térmicas (tales como la conductividad térmica y el calor específico) de los muros de compartimentación y techos.

Al igual que en el caso de las curvas nominales tiempo-temperatura, las curvas paramétricas tiempo-temperatura proporcionan relaciones tiempo-temperatura del gas requeridas para el cálculo. Parten de la hipótesis que la temperatura es uniforme en el recinto, algo que restringe su campo de aplicación a fuegos post-flashover (incendios que se han extendido a todo el recinto tras una inflamación súbita generalizada) en recintos de dimensiones razonables. La curva de fuego que se predice incluye una fase de calentamiento, representada por una curva exponencial que va hasta la temperatura máxima, seguida por una fase de enfriamiento descendiente lineal, hasta alcanzar la temperatura residual, que suele coincidir con la temperatura ambiente. La temperatura máxima y la duración correspondiente del incendio son los dos parámetros principales que afectan al comportamiento del fuego en elementos estructurales. Por ello, se adoptaron como los parámetros centrales en las fórmulas de cálculo de fuegos paramétricos.

En el Anexo A de la norma EN 1991-1-2 puede hallarse un modelo de este tipo. Dicho modelo es válido para compartimentos con una superficie de hasta 500 m², sin aberturas en la cubierta, y una altura máxima de 4 m, para revestimientos de compartimentación con una inercia térmica de entre 100 y 2200 J/m²s^{1/2}K, para un coeficiente de abertura que esté en el rango de 0,02 y 0,20 y para sectores de incendio con cargas de fuego principalmente de tipo celulósico. Debido a estas limitaciones, el modelo se utiliza principalmente para la parte de oficinas de los edificios de una sola planta.

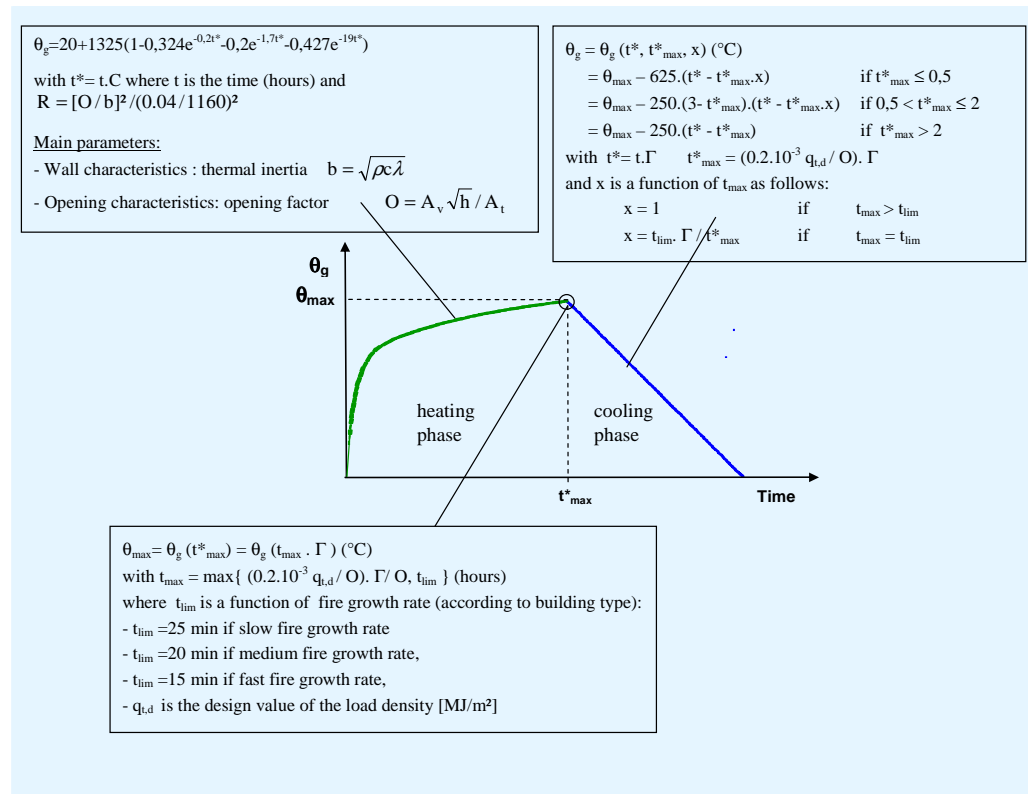


Figura 5.1 Fuego Paramétrico (Anexo A de la norma EN 1991-1-2)

Los datos de entrada de las curvas de fuego paramétrico son el valor de cálculo de la densidad de carga de fuego, la rapidez del desarrollo del fuego, las condiciones de ventilación (descritas en función del tamaño y la ubicación de las aberturas) y las propiedades térmicas (capacidad calorífica, densidad y conductividad) de los muros para evaluar las pérdidas de calor que se dan como consecuencia de la convección y radiación en los límites del compartimento. En lo que a la densidad de carga de fuego se refiere, en la práctica del diseño se suelen consultar los valores característicos indicados en la norma EN 1991-1-2.

A pesar que estas curvas de fuego paramétrico ofrecen una mejora significativa cuando son comparadas con el "fuego ISO" estándar, los fuegos paramétricos no están en situación de ofrecer aún una evaluación muy precisa de la severidad del incendio. Por ello, en algunos países europeos se recomienda su uso exclusivamente para el cálculo del diseño preliminar.

5.1.3 Fuego localizado

El Anexo C de la norma EN 1991-1-2 ofrece enfoques sencillos para determinar las acciones térmicas de los fuegos localizados. Se establecen dos situaciones en función de la altura de la llama del fuego comparándola con el techo del sector de incendio: cuando la llama no llega al techo (siguiendo el método de Heskestad) y cuando la llama llega al techo (siguiendo el método de Hasemi).

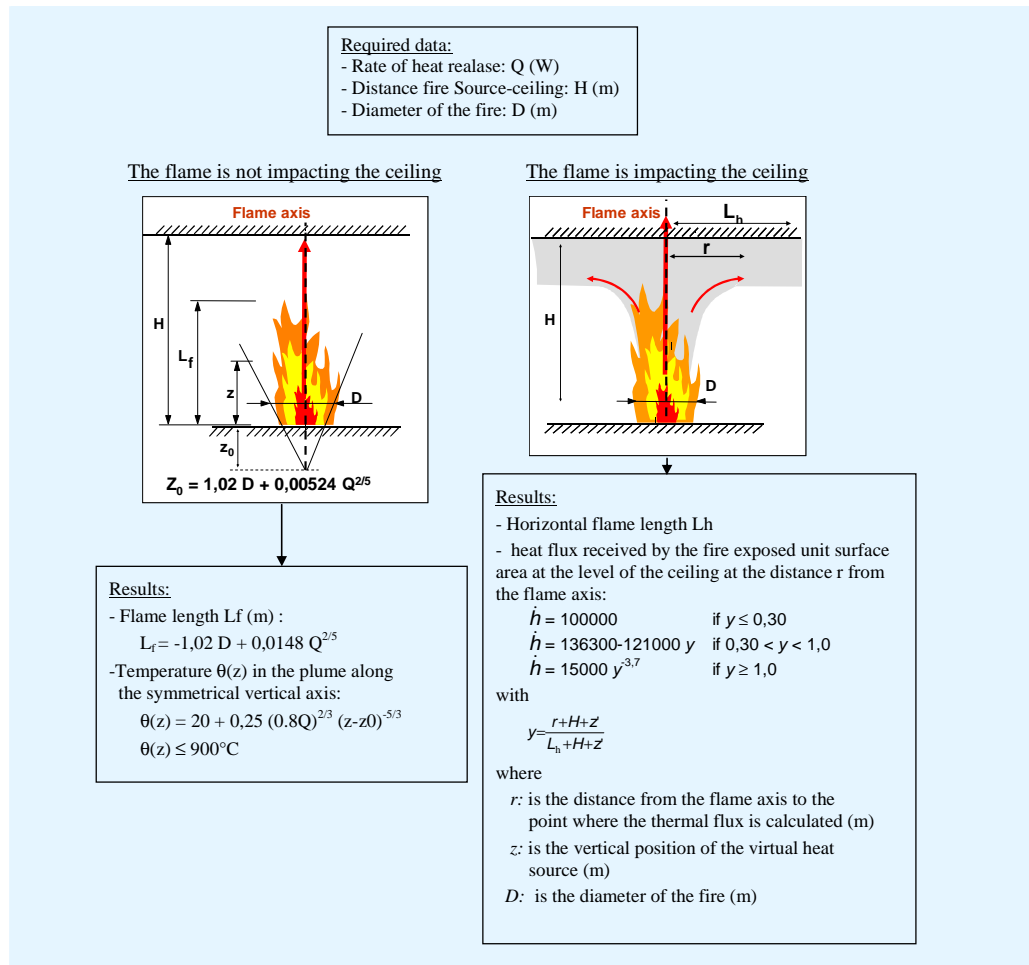


Figura 5.2 Fuego localizado (Anexo C de la norma EN 1991-1-2)

En aquellas situaciones en las que el fuego no llega al techo, se indica una fórmula de diseño para calcular la temperatura en el penacho a lo largo del eje vertical de la llama. En aquellas situaciones en las que el fuego llega al techo, se indican algunos pasos sencillos para calcular el flujo de calor recibido por las superficies expuestas al fuego a nivel del techo.

Estos modelos se suelen utilizar casi siempre para calcular las acciones térmicas (expresadas como el flujo de calor derivado de una parte de radiación y una parte de convección) en los elementos estructurales horizontales, como las vigas. En la actualidad, no existe ningún método para los elementos de acero verticales afectados por un fuego localizado.

Los datos de entrada son la velocidad de generación o liberación de calor (RHR), la distancia entre el origen del incendio y el techo y el diámetro del fuego. La RHR se suele calcular siguiendo lo indicado en el apartado E.4 de la norma EN 1991-1-2.

Estos enfoques se limitan a aquellos casos en los que el diámetro del fuego D es inferior a 10 m y la velocidad de liberación de calor del fuego Q es inferior a 50 MW.

5.2 Modelos térmicos

Si se tiene en cuenta la alta conductividad térmica del acero y el poco espesor de los perfiles de acero que se suelen utilizar en la construcción, es lo suficientemente preciso ignorar los gradientes térmicos en el interior de la sección transversal de los elementos estructurales y asumir una temperatura uniforme cuando se han calentado de manera uniforme.

Por consiguiente, se pueden utilizar ecuaciones de cálculo simples para predecir las temperaturas de los elementos de acero que están expuestos por completo al fuego o de los elementos de acero que soportan una losa de hormigón y expuestos por tres lados. Las reglas existentes para perfiles de acero protegidos contra el fuego son similares, aunque se precisa conocer las propiedades térmicas del material de protección propuesto, algo que puede no resultar fácil de conseguir.

En el caso de elementos mixtos de acero y hormigón, estrictamente hablando, no existe ningún modelo simplificado para estimar la evolución, en términos de tiempo, de la distribución de temperaturas en los elementos. Para simplificar el diseño, en la norma EN 1994-1-2 se facilita información sobre la distribución de temperaturas para los tiempos normales de exposición al fuego estándar (es decir, 30, 60, 90 y 120 minutos).

5.2.1 Elemento de acero sin proteger

El calentamiento de los elementos de acero sin proteger se puede calcular mediante el enfoque analítico simple indicado en la norma EN 1993-1-2. En este método, el aumento de la temperatura depende de las acciones térmicas (expresadas como flujos netos de calor), las propiedades térmicas del acero y el factor de forma del elemento A_m/V definido como la relación entre la superficie expuesta al flujo de calor A_m [m²/m] y el volumen del elemento por unidad de longitud V [m³/m]. En la Figura 5.6 se muestran los factores de forma de secciones de algunos elementos de acero sin proteger.

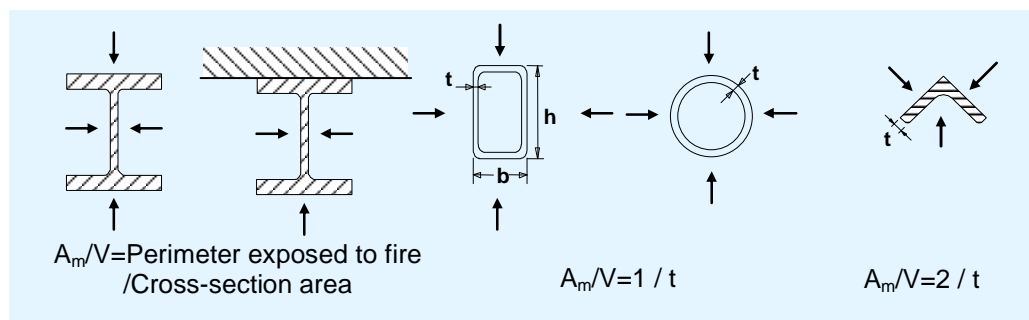


Figura 5.3 Ejemplos del factor de forma para elementos de acero sin proteger

Si se asume una distribución uniforme equivalente de la temperatura en una sección transversal, el aumento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ en un elemento de acero sin proteger durante un intervalo de tiempo Δt puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \text{con } \Delta t \leq 5 \text{ s} \quad (4)$$

donde:

k_{sh} es el coeficiente de corrección del efecto sombra ocasionado por la protección local de la transferencia de calor por radiación debido a la forma del perfil de acero

C_a es el calor específico del acero [J/kgK]

ρ_a es la densidad del acero [kg/m³]

$\dot{h}_{net,d}$ es el flujo neto de calor por unidad de superficie [W/m²]

Si se resuelve la ecuación incremental paso-a-paso, se obtiene el desarrollo de la temperatura en el elemento de acero durante el incendio. Con el fin de garantizar la convergencia numérica de la solución, es preciso adoptar un valor máximo para el incremento temporal. En la norma EN 1993-1-2, se sugiere que el valor de Δt no debería ser superior a 5 segundos.

Las acciones térmicas se determinan mediante el flujo neto de calor absorbido por el elemento de acero durante la exposición al fuego. Se expresa en términos de temperatura del gas caliente, como el resultado de la suma de dos flujos individuales: un flujo convectivo $\dot{h}_{net,c}$ y un flujo por radiación $\dot{h}_{net,r}$.

El flujo de calor por convección se expresa como:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (5)$$

donde:

α_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²K]

θ_g es la temperatura del gas en la proximidad del elemento expuesto al fuego [°C]

θ_m es la temperatura de la superficie del elemento [°C]

El flujo de calor por radiación se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \sigma_0 \epsilon_m ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4) \quad (6)$$

donde:

ϕ es el factor de forma, incluidos los efectos de posición y de sombra (<1)

ϵ_m es la emisividad de la superficie del elemento [°C]

θ_r es la temperatura efectiva de radiación del fuego [°C] ($\theta_r \approx \theta_g$)

θ_m es la temperatura de la superficie del elemento [°C]

σ_0 es la constante de Stephan Boltzmann [= 5,67 10⁻⁸ W/m² K⁴]

Según la EN 1991-1-2, en muchos casos prácticos el factor de forma puede tomarse igual a la unidad. El coeficiente de convección (α_c) varía desde 25 W/m²K (condiciones de fuego estándar) a 50 W/m²K (condiciones de fuego de

hidrocarburos). La emisividad de elementos de acero al carbono y mixtos acero-hormigón puede tomarse como $\varepsilon_m = 0,7$.

En el caso de secciones transversales con una forma convexa, como por ejemplo las secciones huecas de acero, totalmente expuestas al fuego, el efecto sombra no juega un papel importante y se puede considerar $k_{sh} = 1$. Si no, el coeficiente de corrección del efecto sombra k_{sh} se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$k_{sh} = \begin{cases} \frac{0,9[A_m/V]_b}{A_m/V} & \text{for I - sections under nominal fire actions} \\ \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} & \text{for others cases} \end{cases} \quad (7)$$

donde:

$[A_m/V]_b$ es el factor de forma de un cajón envolvente [m^{-1}]

En la Figura 5.4 se han representado las curvas de temperatura correspondientes a la aplicación del método de cálculo indicado en la norma EN 1993-1-2, con exposiciones de 15 y 30 minutos al fuego ISO estándar, en función del factor de forma e incluyendo el efecto sombra $(A_m/V)_{sh} = k_{sh} A_m/V$. Los valores de dichas curvas se han indicado en la Tabla 5.1.

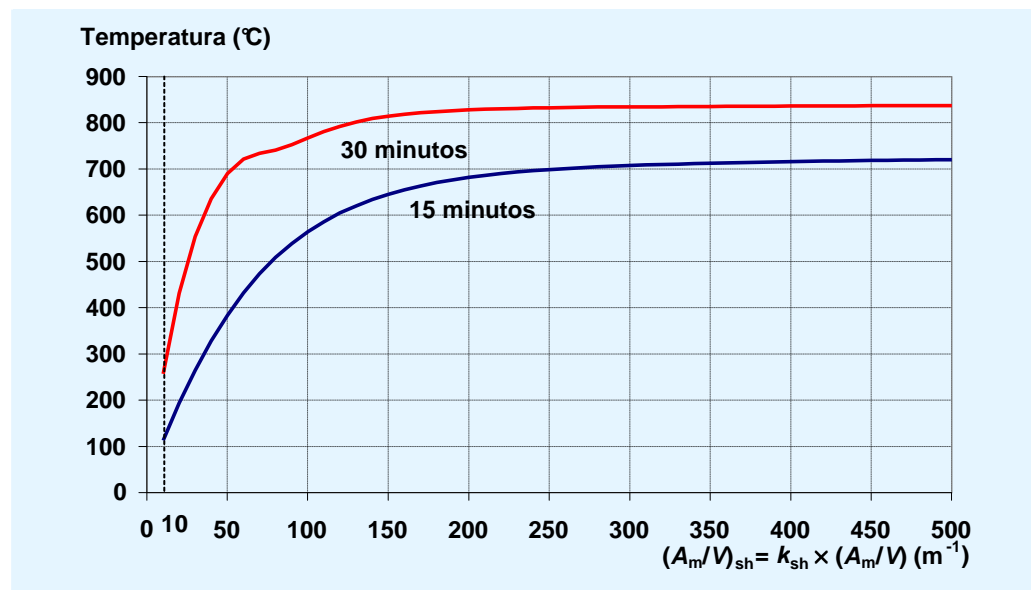


Figura 5.4 Temperatura de los elementos de acero sin proteger tras una exposición a un fuego estandar ISO durante 15 y 30 minutos

Tabla 5.1 Temperatura de los elementos de acero sin proteger tras una exposición a un fuego estandar ISO durante 15 y 30 minutos

Factor de forma (A_m/V) _{sh}	Temperatura del acero (°C)		Factor de forma (A_m/V) _{sh}	Temperatura del acero (°C)	
	15 min	30 min		15 min	30 min
10	113	257	130	621	802
20	194	431	140	634	809
30	265	554	150	646	815
40	328	636	160	655	819
50	383	690	170	664	822
60	432	721	180	671	825
70	473	734	190	677	827
80	509	741	200	682	828
90	539	753	250	699	833
100	565	767	300	708	835
110	586	781	400	716	837
120	605	792	500	720	838

5.2.2 Elemento de acero protegido

La norma EN 1993-1-2 proporciona igualmente un enfoque de cálculo simple para elementos protegidos con materiales de protección pasiva contra el fuego. En tales casos, el aumento de la temperatura depende del factor de forma A_p/V del elemento de acero protegido por el material de protección contra el fuego (A_p es la superficie pertinente del material de protección contra el fuego por unidad de longitud y V es el volumen del elemento de acero por unidad de longitud) y las características del aislamiento. Los materiales aislantes pueden tener la geometría del perfil o pueden ser en cajón, pero el presente método simplificado no abarca los recubrimientos intumescentes. Si se asume una distribución uniforme de la temperatura, el aumento de la temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ en un elemento de acero protegido durante un intervalo de tiempo Δt puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_a\rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1+\phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (8)$$

con:

$$\phi = \frac{c_p\rho_p}{c_a\rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (9)$$

donde:

d_p es el espesor del material de protección contra el fuego [m]

- C_p es el calor específico del material de protección contra el fuego [J/kgK]
- λ_p es la conductividad térmica del material de protección contra el fuego [W/mK]
- ρ_p es la densidad del material de protección contra el fuego [kg/m³]
- θ_g es la temperatura del gas [°C]

La Figura 5.5 indica las expresiones para calcular el factor de forma de elementos de acero protegidos.

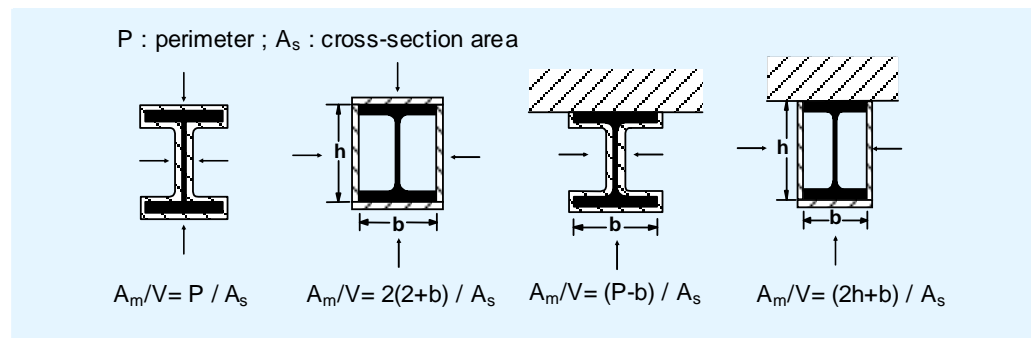


Figura 5.5 Ejemplo del factor de forma para elementos de acero protegidos

Resulta importante tener en cuenta que las características térmicas de los materiales de protección suelen determinarse a partir de ensayos de fuego llevados a cabo en condiciones de fuego estándar. Por ello, en relación con las acciones térmicas basadas en fuegos naturales, se debe realizar con precaución el uso de la ecuación (8) para el cálculo a fuego de elementos de acero protegidos. El cálculo debería llevarse a cabo sólo si se dispone de datos adecuados o si puede demostrarse que las condiciones del fuego no tienen efectos significativos sobre las características térmicas y la integridad de los materiales de protección contra el fuego. No obstante, es práctica habitual aceptar que las propiedades térmicas de un material aislante pueden emplearse bajo condiciones de fuego naturales cuando las temperaturas de los gases calientes permanecen por debajo de la temperatura máxima alcanzada durante la prueba de fuego estándar del material aislante (por ejemplo, alrededor de 1.100°C durante cuatro horas de la curva tiempo-temperatura estándar).

Las propiedades del material que se indican en la Tabla 5.2 pueden servir como una primera aproximación para calcular el calentamiento de los elementos de acero protegidos. Estos valores medios se han extraído a partir de ensayos de fuego llevados a cabo por los fabricantes de los materiales.

Tabla 5.2 Valores medios de las propiedades de los principales materiales de protección contra el fuego

Material		Densidad ρ_p [(kg/m ³)]	Conductividad λ_p [W/mK]	Calor específico C_p [J/kgK]
Spray	Fibra mineral	300	0,12	1200
	Vermiculita y cemento	350	0,12	1200
	perlita	350	0,12	1200
Sprays de alta densidad	vermiculita (o perlita) y cemento	550	0,12	1100
	vermiculita (o perlita) y yeso	650	0,12	1100
Placas	vermiculita (o perlita) y cemento	800	0,2	1200
	silicato o silicato cálcico	600	0,15	1200
	fibrocemento	800	0,15	1200
	panel de yeso	800	0,2	1700
Paneles de fibra prensada	silicato, mineral, lana de roca	150	0,2	1200

5.3 Modelos estructurales

Según los Eurocódigos, son varios los métodos simples de cálculo que pueden utilizarse para evaluar la resistencia al fuego de las estructura en situación de incendio. El primero es el método de la temperatura crítica, que se aplica fundamentalmente en el análisis de los elementos estructurales de acero y el segundo es el modelo simplificado mecánico desarrollado tanto para elementos estructurales de acero como mixtos de acero-hormigón.

Resulta importante recordar que los métodos de cálculo disponibles para los elementos mixtos sólo son válidos para una exposición al fuego estándar. Además, los métodos de cálculo que se indican para los pilares deberían aplicarse únicamente a los elementos de estructuras arriostradas (en los que los extremos de los pilares no presentan desplazamiento horizontal).

5.3.1 Método de la temperatura crítica

La temperatura crítica se calcula teniendo en cuenta las acciones mecánicas aplicadas, la resistencia de cálculo a temperatura normal y la pérdida de resistencia del acero a temperaturas elevadas. Esta temperatura crítica normalmente varía entre 500 y 800°C. Se puede calcular siguiendo las sencillas expresiones que se dan en la norma EN 1993-1-2 o mediante los valores por defecto.

De conformidad con el método de la temperatura crítica, transcurrido un tiempo t , se satisface la resistencia al fuego de un elemento de acero sin efectos

de inestabilidad, si la temperatura del acero $\theta_{a,t}$ no supera la temperatura crítica θ_{cr} del elemento:

$$\theta_{a,t} \leq \theta_{cr} \quad (10)$$

Puede calcularse la temperatura crítica del elemento a partir del grado de utilización o coeficiente de sobredimensionado μ_0 , como se indica a continuación:

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (11)$$

El grado de utilización μ_0 se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (12)$$

donde:

$E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para el dimensionamiento en la situación de incendio, de acuerdo con la norma EN 1991-1-2

$R_{fi,d,0}$ es el valor de cálculo de la resistencia correspondiente del elemento de acero, para el dimensionamiento en la situación de incendio para el instante $t=0$ (a temperatura normal) pero con un coeficiente parcial de seguridad del material $\gamma_{M,fi}$ en situación de incendio

La expresión θ_{cr} puede utilizarse para todas las clases de sección, excepto para las secciones muy esbeltas de Clase 4, para las que se debería utilizar una única temperatura crítica conservadora de 350°C.

En principio, la expresión (11) es aplicable a elementos a flexión sin efectos de inestabilidad, pilares cortos sin pandeo y a elementos a tracción, con calentamiento uniforme o con un pequeño gradiente de temperatura. Sin embargo, en situaciones de inestabilidad (pilares esbultos, vigas sin arriostrar), el método se puede aplicar si se obtiene la resistencia de cálculo para la situación de incendio en el instante $t = 0$ con un valor de la esbeltez que tiene en cuenta los efectos de la temperatura en la esbeltez de los elementos estructurales. De manera simplificada, la esbeltez en situación de incendio puede tomarse como $\bar{\lambda}_{\theta} = 1,3\bar{\lambda}$ (donde $\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional a temperatura normal).

Como alternativa, en lo que respecta a la expresión (11), se pueden proporcionar a nivel nacional unas temperaturas críticas determinadas por medio del anexo nacional de la norma EN 1993-1-2.

También se puede utilizar una expresión conservadora simple de μ_0 para los elementos a tracción y vigas arriostradas (cuando el pandeo lateral no sea un modo potencial de fallo):

$$\mu_0 = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \kappa_1 \kappa_2 \quad (13)$$

donde:

- $\eta_{fi,t}$ es el nivel de carga en el instante t
- $\gamma_{M,fi}$ es el coeficiente parcial de seguridad pertinente para la situación de incendio ($\gamma_{M,fi} = 1$)
- γ_{M0} es el coeficiente parcial de seguridad a temperatura normal ($\gamma_{M0} = 1$)
- κ_1, κ_2 son los factores de adaptación para tener en cuenta una distribución de la temperatura no uniforme en el elemento de acero.

El nivel de carga en un instante t se define como:

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d}}{R_d} \quad (14)$$

donde:

- $E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para el dimensionamiento en la situación de incendio, de acuerdo con la norma EN 1991-1-2
- R_d es la resistencia última a temperatura ambiente

Durante una duración determinada t del incendio y si se asume que $\theta_{a,t} = \theta_{cr}$, se puede calcular fácilmente a partir de (11) el valor máximo del grado de utilización μ_0 de los elementos de acero sin proteger, que cumpla la resistencia al fuego requerida, en función del factor de forma que incluyendo el efecto sombra $(A_m/V)_{sh}$. De esta forma, se puede dar por hecho que la resistencia al fuego de los elementos de acero sin proteger se cumple después de un tiempo t si:

$$\mu_0 \leq \mu_{max} \quad (15)$$

En la Figura 5.6 se indican los grados de utilización máximos μ_{max} calculados para una resistencia al fuego estándar R15 y R30. Es preciso tener en cuenta que para una resistencia al fuego de R30, los elementos sin protección con un factor de forma $(A_m/V)_{sh}$ superior a 50 m^{-1} sólo pueden alcanzar valores muy bajos del grado de utilización.

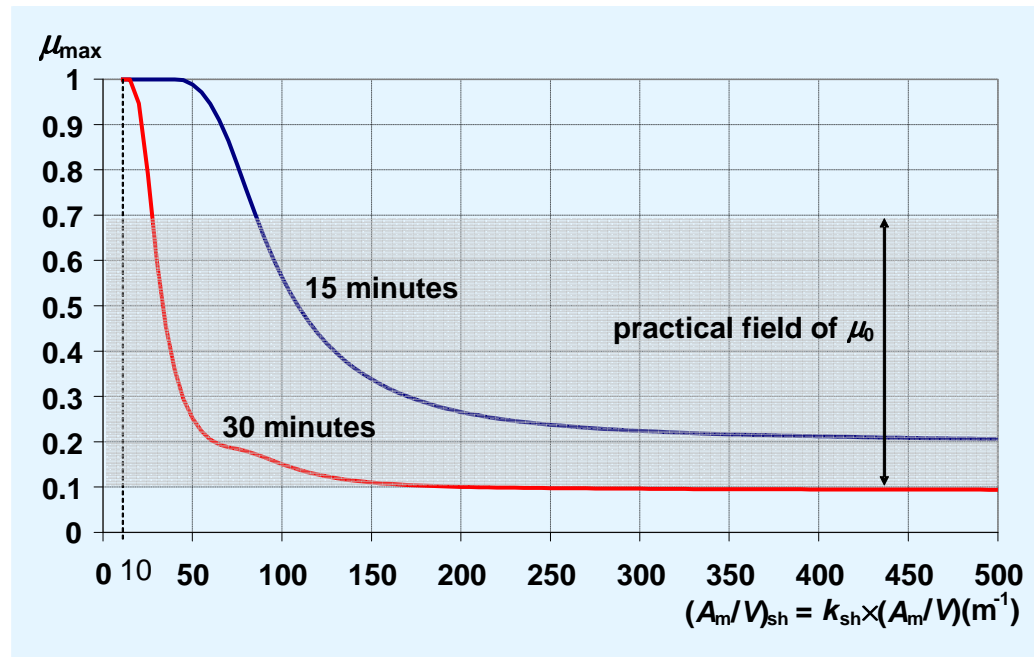


Figura 5.6 Máximo grado de utilización en función del factor de forma $(A_m/V)_{sh}$

5.3.2 Método de cálculo simple para los elementos de acero

Según la norma EN 1993-1-2, se debe suponer que la función portante de un elemento de acero se mantiene en una situación de incendio determinada después de un instante t si:

$$E_{fi,d} < R_{fi,d,t} \quad (16)$$

donde:

$E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para el dimensionamiento en la situación de incendio, de acuerdo con la norma EN 1991-1-2

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

Los siguientes métodos simplificados de cálculo permiten al proyectista evaluar la resistencia de cálculo al fuego (resistencia al pandeo, momento resistente) de los elementos de acero. Se basan principalmente en la suposición de una temperatura constante en la sección.

Pilares de acero sometidos a compresión

La resistencia de cálculo en la situación de incendio en un tiempo t de un elemento de compresión con secciones transversales Clase 1, 2 ó 3 y con una temperatura uniforme θ_a debería calcularse así:

$$N_{fi,t,Rd} = \chi_{fi}(\bar{\lambda}_{\theta}) \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} k_{y,\theta} N_{Rd} \quad (17)$$

donde:

- $k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ_a alcanzada en el instante t
- $\gamma_{M,fi}$ es el coeficiente parcial de seguridad pertinente para la situación de incendio ($\gamma_{M,fi} = 1$)
- γ_{M0} es el coeficiente parcial de seguridad a temperatura normal ($\gamma_{M0} = 1$)
- N_{Rd} es la resistencia de cálculo de la sección transversal $N_{pl,Rd}$ para cálculo a temperatura normal de acuerdo con EN 1993-1-1
- χ_{fi} es el coeficiente de reducción del pandeo por flexión para el dimensionamiento en la situación de incendio

El factor de reducción χ_{fi} del pandeo a flexión se obtiene a partir de la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}_\theta$ a temperatura θ mediante:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad \text{pero} \quad \chi_{fi} \leq 1.0 \quad (18)$$

con:

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right]$$

donde:

- α es el factor de imperfección dado por $\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y}$, siendo f_y el valor característico de límite elástico del acero.

La esbeltez adimensional para la temperatura θ se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}} \quad (19)$$

donde:

- $k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ
- $k_{E,\theta}$ es el coeficiente de reducción para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura del acero θ
- $\bar{\lambda}$ La esbeltez adimensional a temperatura normal, de acuerdo con EN 1993-1-1

La esbeltez adimensional a temperatura normal se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\bar{\lambda} = \frac{\ell_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (20)$$

donde:

- ℓ_{cr} es la longitud de pandeo en el plano de pandeo considerado
- i es el radio de giro en el eje correspondiente, determinado mediante las propiedades de la sección transversal bruta

A efectos prácticos, el coeficiente de reducción χ_{fi} del pandeo a flexión se puede calcular directamente a partir de los valores que se indican en la Tabla 5.3, en función del tipo de acero y la esbeltez adimensional del elemento de acero a temperatura normal $\bar{\lambda}$. Los valores del coeficiente de reducción χ_{fi} indicados en la Tabla 5.3 se calcularon asumiendo una esbeltez en situación de incendio $\bar{\lambda}_0 = 1.3\bar{\lambda}$. Se puede utilizar la interpolación lineal para valores intermedios de esbeltez adimensional.

Tabla 5.3 Valores del coeficiente de reducción χ_{fi} en función de la esbeltez adimensional a temperatura normal $\bar{\lambda}$ y el tipo de acero

$\bar{\lambda}$	Tipo de acero			$\bar{\lambda}$	Tipo de acero		
	S235	S275	S355		S235	S275	S355
0,2	0,8480	0,8577	0,8725	1,7	0,1520	0,1549	0,1594
0,3	0,7767	0,7897	0,8096	1,8	0,1381	0,1406	0,1445
0,4	0,7054	0,7204	0,7439	1,9	0,1260	0,1282	0,1315
0,5	0,6341	0,6500	0,6752	2	0,1153	0,1172	0,1202
0,6	0,5643	0,5800	0,6050	2,1	0,1060	0,1076	0,1102
0,7	0,4983	0,5127	0,5361	2,2	0,0977	0,0991	0,1014
0,8	0,4378	0,4506	0,4713	2,3	0,0903	0,0916	0,0936
0,9	0,3841	0,3951	0,4128	2,4	0,0837	0,0849	0,0866
1	0,3373	0,3466	0,3614	2,5	0,0778	0,0788	0,0804
1,1	0,2970	0,3048	0,3172	2,6	0,0725	0,0734	0,0749
1,2	0,2626	0,2691	0,2794	2,7	0,0677	0,0686	0,0699
1,3	0,2332	0,2387	0,2473	2,8	0,0634	0,0642	0,0653
1,4	0,2081	0,2127	0,2200	2,9	0,0595	0,0602	0,0612
1,5	0,1865	0,1905	0,1966	3	0,0559	0,0565	0,0575
1,6	0,1680	0,1714	0,1766				

Vigas de acero

El momento resistente de cálculo en la situación de incendio para una viga no arriostrada lateralmente con secciones transversales Clase 1, 2 ó 3, a una temperatura uniforme θ_a viene dado por:

$$M_{fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi}(\bar{\lambda}_\theta) \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} k_{y,\theta} M_{Rd} \quad (21)$$

donde:

- $k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero a la temperatura del acero θ que se alcanza en el instante t

M_{Rd} es el momento resistente de la sección transversal bruta (momento resistente plástico $M_{pl,Rd}$ o momento resistente elástico $M_{el,Rd}$ para el cálculo a temperatura normal de acuerdo con EN 1993-1-1)

$\chi_{LT,fi}$ es el coeficiente de reducción del pandeo lateral en la situación de diseño de incendio. Se puede calcular de la misma manera que el coeficiente de reducción para el pandeo por flexión, pero utilizando la esbeltez adimensional adecuada

Para vigas con arriostramiento lateral, se puede utilizar el mismo método de cálculo, asumiendo $\chi_{LT,fi} = 1$.

A menudo los elementos estructurales no tienen una temperatura uniforme. Se puede introducir un factor de adaptación κ_1 para tener en cuenta una distribución no uniforme de temperaturas a lo largo del canto de la sección de acero. También se puede introducir un factor de adaptación adicional κ_2 para tener en cuenta las variaciones de temperatura a lo largo de la longitud del elemento en el caso de una viga hiperestática. El valor de los factores de adaptación κ_1 y κ_2 se debería calcular siguiendo lo indicado en la norma EN 1993-1-2.

Elementos sometidos a flexión y compresión axil combinadas

También se puede seguir un método de cálculo simplificado para comprobar la resistencia al fuego de los elementos de acero sujetos a flexión y compresión axil combinadas, como por ejemplo, pilares esbeltos con excentricidad de carga y vigas largas con pandeo. En estas situaciones, el modelo de cálculo simple tiene en cuenta el efecto combinado de compresión y flexión, al combinar los dos modelos anteriores en la situación de carga simple. Para más información, véase la norma EN 1993-1-2.

5.3.3 Determinación del espesor del material de protección contra el fuego

En aquellas situaciones en las que los requisitos respecto a la resistencia al fuego son altos (normalmente superiores a R30), la aplicación de normas prescriptivas suele desembocar en la protección adicional contra el fuego de las estructuras de acero. Cuando se necesita una protección pasiva contra el fuego, conocer la temperatura crítica, el factor de forma y el tiempo de resistencia al fuego requerido, permite elegir un sistema de protección contra el fuego determinado (spray, paneles, recubrimiento intumescente), así como determinar el espesor que se debe aplicar. En la práctica, sólo se pueden utilizar productos que hayan sido ensayados y evaluados en ensayos de fuego estándar, de conformidad con la norma europea EN 13881.

El espesor necesario suele determinarse a partir de los datos proporcionados por el fabricante. Dichos datos pueden consultarse en forma de tabla o diagrama, tal y como se indica en la Figura 5.7. Los datos normalmente establecen una correlación entre el espesor del material de protección contra el fuego y el factor de forma del elemento de acero (A_p/V), la temperatura crítica y el tiempo requerido de resistencia al fuego. En las construcciones típicas de

edificios, en las que se utilizan perfiles de acero estándar I y H, el valor de A_m/V suele estar en el rango de $30 - 450 \text{ m}^{-1}$.

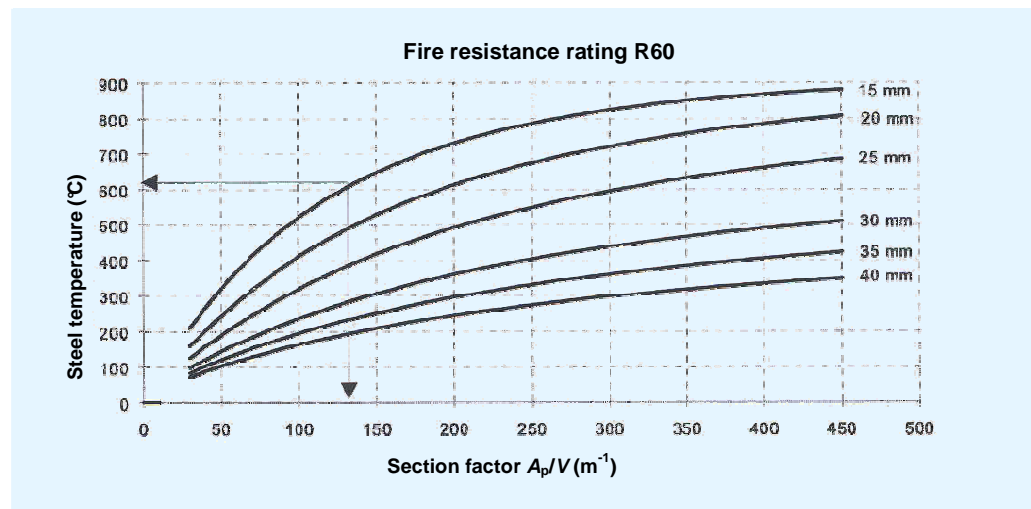


Figure 5.7 Ejemplo de un gráfico francés para protección con placas

A efectos prácticos de cálculo, para un determinado material de protección contra el fuego, se puede determinar el espesor en función de los siguientes pasos:

- Selección de los datos relativos al tiempo de resistencia al fuego requerido
- Cálculo del factor de forma según la forma del perfil de acero, la presencia de cualquier tipo de sombra en el elemento estructural en comparación con la transferencia de calor del fuego durante la duración del incendio (por ejemplo, una losa de hormigón colocada en el ala superior del perfil), el tipo de protección contra el fuego (siguiendo la geometría del perfil de acero o en forma de cajón).
- Determinación del espesor a partir de los datos del fabricante valiéndose de la temperatura crítica y el factor de forma. Para determinar el espesor se puede utilizar la interpolación lineal.

La Convención Europea de la Construcción Metálica (ECCS) ha desarrollado los denominados Euro-nomogramas^[13], que relacionan para un determinado tiempo de exposición al fuego estándar, la temperatura alcanzada por los elementos de acero protegidos y el factor $(\lambda_p/d_p) \times (A_p/V)$, en función de las características de la protección (λ_p y d_p) y el factor de forma A_p/V . Es preciso tener en cuenta que estos Euro-nomogramas se determinan a partir de la versión ENV de la parte relativa al fuego del Eurocódigo 3. Por esta razón, deberían emplearse con cierta precaución. Recientemente se han desarrollado otros nomogramas siguiendo la EN 1993-1-2^[14].

5.3.4 Tablas de diseño para elementos mixtos

Las tablas de diseño para elementos mixtos se indican en la norma EN 1994-1-2. Resultan de aplicación únicamente para elementos mixtos de acero y hormigón (vigas mixtas con recubrimiento parcial o total de la viga de acero con hormigón, pilares mixtos con perfiles recubiertos con hormigón parcial o totalmente, pilares mixtos con perfiles tubulares de acero rectangulares o circulares rellenos de hormigón). Se utilizan valores predeterminados, que se

basan principalmente en los resultados de ensayos con fuego estándar, mejorados gracias a la investigación analítica. Utilizando estas tablas, el proyectista podrá calcular de manera rápida el tamaño del elemento (dimensiones mínimas de la sección transversal, la cuantía de armadura necesaria y el recubrimiento mínimo de hormigón), como una función del nivel de carga para resistencias comunes al fuego estándar. La principal ventaja que presenta este método es la facilidad con la que puede aplicarse. Sin embargo, presenta una limitación en cuanto a que aplica una serie de reglas geométricas muy estrictas y proporciona resultados más conservadores si se comparan con otros modelos simples de cálculo o con modelos avanzados de cálculo. Por ese motivo, sólo deberían aplicarse en la fase preliminar de cálculo de un edificio.

Para más información, véase la norma EN 1994-1-2.

5.3.5 Modelos simplificados de cálculo para elementos mixtos

Los métodos de cálculo indicados a continuación fueron desarrollados para determinar la resistencia de los elementos individuales al ser expuestos a la curva de fuego estándar. Por ello, no son aplicables para el cálculo a fuegos “naturales”.

Aquí sólo se describen los métodos de cálculo para los elementos mixtos que se utilizan con mayor frecuencia en los edificios de una sola planta (pilares mixtos y vigas de acero parcialmente recubiertas con hormigón).

Pilares mixtos

Gracias a los métodos simples de cálculo para pilares, el proyectista podrá evaluar la resistencia al fuego de un pilar mixto calculando su resistencia de pandeo mediante la distribución de la temperatura en la sección transversal y la resistencia reducida correspondiente del material, definida para el tiempo de resistencia al fuego requerido. Este método se basa en el concepto de la curva de pandeo: la resistencia plástica a la compresión axial $N_{fi,pl,Rd}$ y la rigidez efectiva a flexión $(EI)_{fi,eff}$ se emplean para obtener un coeficiente de reducción para el pandeo. El método se puede aplicar a todos los tipos de pilares mixtos, siempre y cuando se utilice la curva de pandeo adecuada. La comprobación del pilar, consiste en verificar que la compresión axial (para la combinación de acciones que se tienen en cuenta en una situación de incendio según la norma EN 1991-1-2) es inferior a la resistencia de pandeo del pilar.

Para una distribución de temperatura determinada en la sección transversal, se puede determinar la resistencia de cálculo de un pilar mixto ($N_{fi,Rd}$) a partir de la curva adecuada de pandeo del pilar, relacionando la capacidad de carga ($N_{fi,Rd}$) con la carga plástica ($N_{fi,pl,Rd}$) y la carga crítica elástica ($N_{fi,cr}$), de la siguiente manera:

$$N_{fi,Rd} = \chi(\bar{\lambda}_0) \cdot N_{fi,pl,Rd} \quad (22)$$

χ es el factor de reducción del pandeo por flexión que depende de la esbeltez en una situación de incendio $\bar{\lambda}_0$, que en el caso de los pilares mixtos, $\bar{\lambda}_0$ se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{N_{fi,pl,R} / N_{fi,cr}} \quad (23)$$

donde:

$N_{fi,cr}$ es la carga de pandeo de Euler

$N_{fi,pl,R}$ es el valor de $N_{fi,pl,Rd}$ según (24) cuando los factores parciales de seguridad $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,fi,s}$, y $\gamma_{M,fi,c}$, de los materiales son iguales a 1.0.

El coeficiente de reducción χ se determina de la misma forma que para el diseño a temperatura normal, pero utilizando la curva de pandeo adecuada que se define como una función del tipo de pilar (perfil de acero con recubrimiento parcial de hormigón, perfil de acero tubular relleno de hormigón).

La carga plástica última $N_{fi,pl,Rd}$ de la sección transversal se calcula sumando las resistencias de todas las partes de la sección transversal (límite elástico de las partes de acero, resistencia a compresión de las partes de hormigón) multiplicadas por las áreas correspondientes, teniendo en cuenta el efecto de la temperatura en estos elementos, pero sin considerar su interacción (debido a las tensiones térmicas), es decir:

$$N_{fi,pl,Rd} = \sum_j (A_a \cdot \frac{f_{ay,\theta}}{\gamma_{M,fi,a}}) + \sum_k (A_s \cdot \frac{f_{s,\theta}}{\gamma_{M,fi,s}}) + \sum_m (A_c \cdot \frac{f_{c,\theta}}{\gamma_{M,fi,c}}) \quad (24)$$

$N_{fi,cr}$ es la carga de pandeo de Euler calculada como una función de la rigidez efectiva a flexión de la sección transversal $(EI)_{fi,eff}$ y la longitud de pandeo ℓ_θ del pilar en una situación de incendio, es decir:

$$N_{fi,cr} = \pi^2 \frac{(EI)_{fi,eff}}{\ell_\theta^2} \quad (25)$$

La rigidez efectiva $(EI)_{fi,eff}$ se determina mediante la siguiente ecuación:

$$(EI)_{fi,eff} = \sum_j (\varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k (\varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m (\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}) \quad (26)$$

donde:

$E_{i,\theta}$ es el módulo característico del material i a la temperatura θ . En el caso del acero, es el módulo de elasticidad. En el caso del hormigón: $E_{c,\theta} = 3 E_{c,sec} / 2$ donde $E_{c,sec,\theta}$ es el valor característico del modulo secante del hormigón en una situación de incendio, que se obtiene a partir de la relación entre $f_{c,\theta}$ y $\epsilon_{cu,\theta}$

I_i es el momento de inercia del material i relacionado con el eje central (y ó z) de la sección transversal mixta

$\varphi_{a,\theta}$ (para perfiles de acero), $\varphi_{s,\theta}$ (para armaduras) y $\varphi_{c,\theta}$ (para hormigón) son los coeficientes de reducción debido a los efectos de las tensiones térmicas.

Para más información, véase el apartado 4.3.5 de la norma EN 1994-1-2.

Vigas de acero parcialmente recubiertas con hormigón

Gracias al método simple de cálculo simple para vigas de acero parcialmente recubiertas con hormigón, el proyectista puede evaluar la resistencia al fuego

calculando su resistencia a flexión para el tiempo de resistencia al fuego requerido. Se basa en la teoría simple del momento plástico. El método requiere el cálculo del eje neutro y la resistencia a flexión correspondiente, teniendo en cuenta la distribución de temperatura en la sección transversal y la resistencia reducida correspondiente del material. Se distingue entre la capacidad de momento positivo (normalmente en el medio de la luz) y la capacidad de momento negativo (en el pilar, si procede). Si el momento aplicado es inferior a la resistencia a flexión de la viga, se considera que el elemento tiene una resistencia al fuego adecuada.

El eje neutro plástico de la viga se determina de tal manera que las fuerzas de tracción y compresión que actúan en la sección estén en equilibrio:

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) = 0 \quad (27)$$

donde:

$f_{y,i}$ es el límite elástico nominal para el área elemental de acero A_i , tomado como positivo en el lado de compresión del eje neutro plástico y negativo en el lado sometido a tracción

$f_{c,j}$ es la resistencia nominal a compresión para el área elemental de hormigón A_j , tomada como positiva en el lado de compresión del eje neutro plástico y negativa en el lado sometido a tracción

El valor de cálculo de la resistencia a flexión $M_{fi,t,Rd}$ se puede calcular mediante la ecuación siguiente:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \left(\frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi,a}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j z_j k_{c,\theta,j} \left(\frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (28)$$

donde:

z_i, z_j son las distancias desde el eje neutro plástico al centroide del área de los elementos A_i y A_j

Para obtener el valor de cálculo de la resistencia a flexión, la sección transversal se divide en diversos elementos, a saber:

- las alas del perfil de acero
- el alma (partes superior e inferior) del perfil de acero
- las armaduras
- el recubrimiento de hormigón.

Para cada una de estas partes de la sección transversal se proporcionan unas reglas sencillas que definen el efecto de las temperaturas y permiten calcular la resistencia característica reducida en función de la resistencia al fuego estándar R30, R60, R90 o R120.

Para más información, véase el apartado 4.3.4 de la norma EN 1994-1-2.

5.4 Normas de diseño específicas para edificios de una sola planta

Las normas nacionales de muchos países europeos relativas al fuego han sufrido modificaciones recientemente para introducir, en el caso de edificios de almacenamiento e industriales de una sola planta que presentan importantes riesgos de incendio (altas cargas de fuego), requisitos de seguridad específicos en cuanto al comportamiento estructural como alternativa a los requisitos prescriptivos estándar. Con el fin de garantizar la seguridad adecuada de las vidas de los ocupantes del edificio y de los bomberos, es preciso cumplir los siguientes criterios relativos al comportamiento estructural de los edificios de almacenamiento e industriales (estructura portante, elementos de la fachada, cubierta y muros cortafuegos):

- En caso que haya un incendio en uno de los sectores del edificio, su estructura (incluidos los elementos de la fachada) no deben colapsar hacia fuera.
- En caso que haya un incendio en una de los sectores del edificio, el fallo localizado del sector en llamas no debe desencadenar el colapso de los sectores colindantes.

Con el fin de contribuir al diseño de edificios de almacenamiento e industriales con estructura de acero, pueden emplearse diversos métodos simples de diseño simple^[5,6]. Mediante estos métodos de diseño, el proyectista puede probar de manera sencilla que el comportamiento de la estructura de acero de estos edificios en situaciones de incendio cumple los criterios anteriores. Los métodos están incluidos en el software LUCA^[6].

Los métodos de cálculo permiten al proyectista:

- Evaluar las fuerzas inducidas por el colapso de las partes calientes de la estructura. Estas fuerzas deberían emplearse como una carga horizontal adicional para la comprobación de la estabilidad de la parte de la estructura que permanece fría durante el incendio. Esa parte puede evaluarse mediante las herramientas de cálculo en condiciones normales para el análisis de la estructura.
- Proporcionar los desplazamientos horizontales máximos desarrollados en los extremos del recinto afectado por el incendio. Estos desplazamientos se utilizan para asegurarse que los movimientos de la estructura, en caso de incendio, no afecten de manera negativa a la estabilidad de los muros cortafuegos ni de la fachada del edificio. Los métodos de cálculo empleados para esta comprobación dependen del tipo de muro (por ejemplo, hormigón ligero, hormigón armado, bloques aligerados, chapas perfiladas de acero con aislamiento, yeso, muros de fábrica, etc.) y su unión con la estructura de acero.

Estos métodos pueden utilizarse para el cálculo de los siguientes tipos de edificios:

- Edificios de almacenamiento e industriales con estructuras de acero. Tanto pórticos de acero con perfiles laminados en caliente estándar H e I o vigas de chapa armada equivalentes, como estructuras de acero formadas por

vigas en celosía con pilares con perfiles laminados en caliente estándar H e I o de chapa armada.

- Edificios de almacenamiento e industriales de pórticos divididos en varios sectores, separados entre sí por muros cortafuegos. Estos muros pueden ser o bien perpendiculares a los pórticos de acero o paralelos a los mismos (véase la Figura 5.8).

Estos métodos se diseñaron específicamente para edificios de almacenamiento e industriales, si bien pueden aplicarse a otro tipo de edificios de una sola planta.

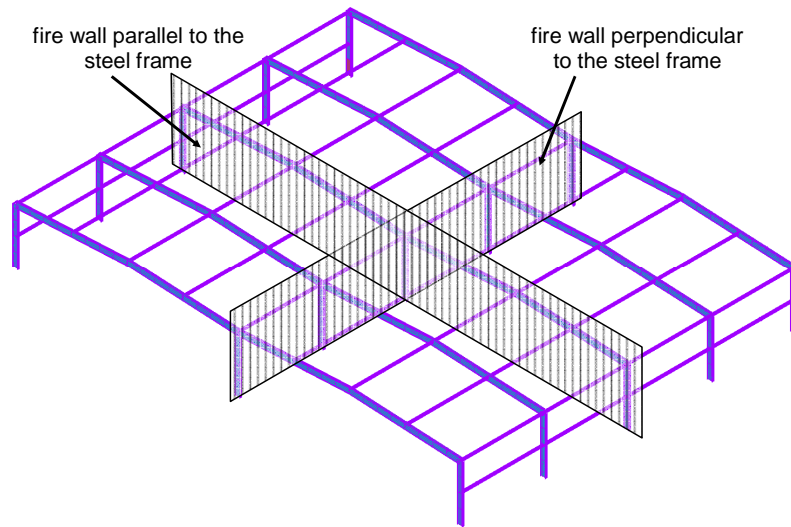


Figura 5.8 Posición del muro cortafuegos en relación con los pórticos de acero

Los métodos de cálculo (véase el apartado 5.5) sólo son necesarios cuando los muros cortafuegos son perpendiculares a los pórticos de acero del edificio y la altura del edificio es superior a 20 m^[5]. Cuando los muros cortafuegos son paralelos a los pórticos de acero, el riesgo de colapso hacia fuera y el colapso progresivo (entre distintos sectores de incendio) se puede evitar si se siguen las recomendaciones del apartado 5.5.3.

5.5 Métodos simplificados de cálculo

En la Figura 5.9 se muestra un diagrama de flujo que incluye los métodos de cálculo simplificado.

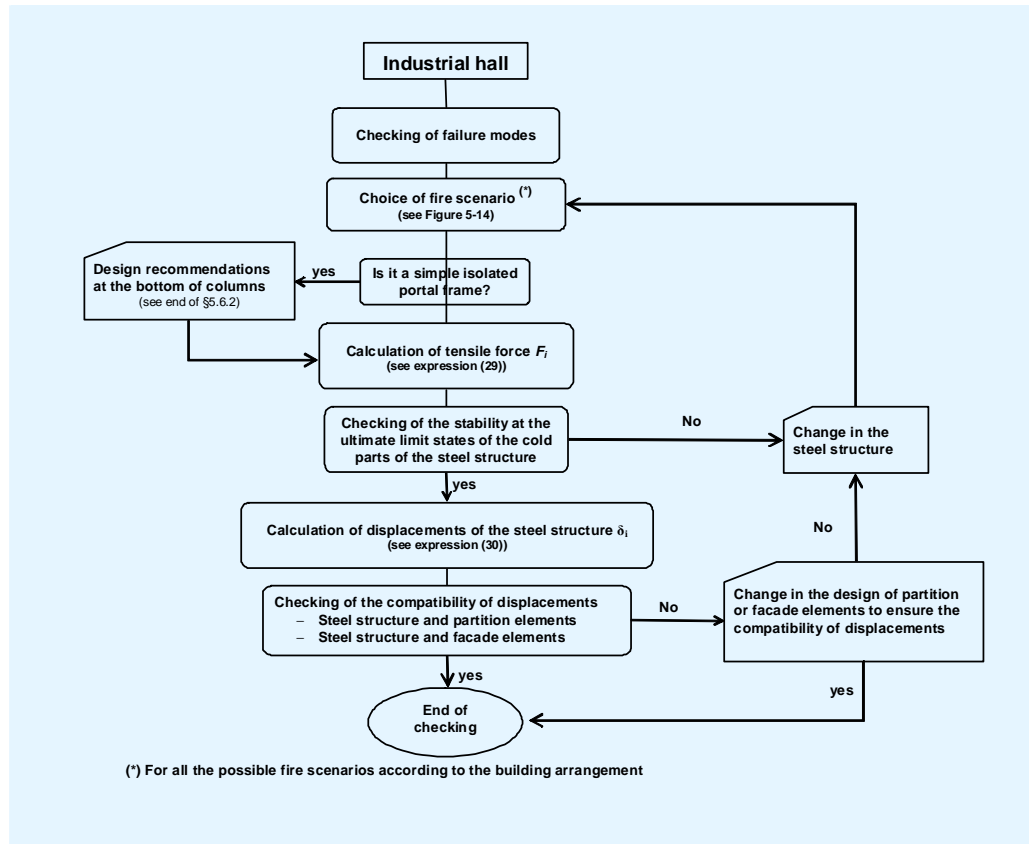


Figura 5.9 Diagrama de flujo para aplicación de los métodos de cálculo

Los cálculos del esfuerzo de tracción y los desplazamientos laterales en los extremos de los sectores deben llevarse a cabo teniendo en cuenta todas las situaciones de incendio posibles. En el apartado 5.5.3 se recogen algunos ejemplos de situaciones de incendio. En los apartados 5.5.1 y 5.5.2 se indican los métodos de cálculo.

5.5.1 Esfuerzos de tracción en los extremos del compartimento

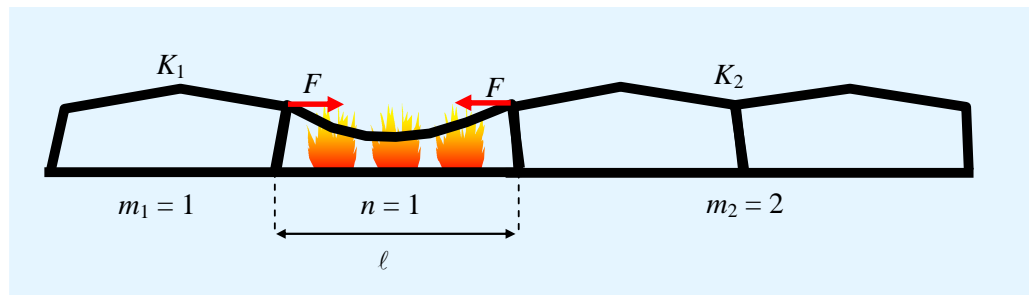


Figura 5.10 Esfuerzo horizontal de tracción en los extremos del sector de incendio

Cuando se desata un incendio en el compartimento de un edificio, la fuerza de tracción horizontal F en el extremo del compartimento que resulta del colapso

de la estructura de la cubierta (véase la Figura 5.10), que se necesita para verificar la estabilidad de la parte fría de la estructura, puede obtenerse así:

$$F = c_p n_{\text{eff}} q \ell \quad (29)$$

donde:

c_p es un coeficiente empírico (depende de la pendiente de la cubierta y del tipo de estructura de acero)

$$c_p = \begin{cases} 1,19 & \text{para } 0\% \text{ pendiente} \\ 1,16 & \text{para } 5\% \text{ pendiente} \\ 1,10 & \text{para } 10\% \text{ pendiente} \end{cases} \quad \text{para pórticos de vigas}$$

$$1,45 \quad \text{para pórticos en celosía}$$

n_{eff} es el coeficiente relativo al número total de naves (vanos) calientes n en el sector de incendio (véase la Tabla 5.4)

q es la carga lineal en la cubierta [N/m] (equivalente a la densidad de carga multiplicada por el espacio entre pórticos) aplicada a la viga y calculada en una situación de incendio ($q = G + \psi_1 \times S_n$), donde G es la carga permanente incluido el peso propio de la estructura de acero, S_n es la carga de la nieve y ψ_1 es el factor de carga en función de los coeficientes de combinación de acciones definidos en la norma EN 1990 y en los anexos nacionales correspondientes.

ℓ es la luz del vano de la nave caliente conectada al pilar [m]

Tabla 5.4 Valores del coeficiente n_{eff}

Número de naves incendiadas	Pórtico de vigas		Pórtico de celosía	
	Localización del recinto incendiado		Localización del recinto incendiado	
	extremo	central	extremo	central
$n = 1$	$n_{\text{eff}}=0,5$	$n_{\text{eff}}=1,0$	$n_{\text{eff}}=0,6$	$n_{\text{eff}}=1,0$
$n \geq 2$	$n_{\text{eff}}=1,0$	$n_{\text{eff}}=2,0$	$n_{\text{eff}}=1,0$	$n_{\text{eff}}=1,0$

Cuando los pilares del pórtico de acero soportan un muro cortafuegos, dichos pilares deberían estar diseñados (asegurando una base lo suficientemente robusta para los pilares) para resistir una fuerza horizontal calculada según la ecuación (29), pero en la que $n_{\text{eff}} = 1,0$.

5.5.2 Desplazamientos laterales en los extremos del sector de incendio

En caso de incendio, los movimientos de los edificios de acero de una sola planta pueden ser del orden de varias decenas de centímetros y por lo tanto, podrían desembocar en el fallo de la fachada o del elemento divisorio, si no es lo suficientemente dúctil o no está fijado adecuadamente. Por ello, resulta importante comprobar que los elementos de la fachada y los muros cortafuegos que están en contacto con la estructura de acero sean compatibles con los desplazamientos laterales desarrollados en los extremos de los sectores de

incendio y que se mantengan íntegros, con el fin de evitar el colapso hacia fuera y el colapso progresivo entre distintos recintos del incendio

Los desplazamientos laterales máximos δ_i ($i = 1, 2$) inducidos en la parte superior de los pilares situados en los extremos del compartimento pueden obtenerse mediante la siguiente expresión (véase la Figura 5.11):

$$\delta_i = \begin{cases} \frac{K_t}{K_i} c_{th} n l & \text{cuando el incendio se dé en el extremo del edificio} \\ \text{Max} \left\{ \frac{K_t}{K_i} c_{th} n l; \frac{F}{K_i} \right\} & \text{cuando el incendio se dé en medio del edificio} \end{cases} \quad (30)$$

donde:

n es el número de naves calientes

K_i es la rigidez lateral equivalente de la parte en cuestión i de la estructura [N/m]

K_t es la rigidez equivalente (en función de la rigidez equivalente K_1 y K_2) que se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$K_t = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

ℓ es la luz de la nave caliente conectada al pilar [m]

F es la fuerza de tracción [N]

c_{th} es un coeficiente empírico (dependiendo de la pendiente de la cubierta y el tipo de estructura de acero)

$$c_{th} = \begin{cases} 0,01 & \text{para } 0\% \text{ pendiente} \\ 0,011 & \text{para } 5\% \text{ pendiente} \\ 0,015 & \text{para } 10\% \text{ pendiente} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{pórticos con vigas} \\ \text{pórticos en celosía} \end{matrix}$$

Rigidez lateral K para un incendio en medio de la estructura

Si el compartimento del incendio está en medio de una estructura, tal y como se muestra en la Figura 5.11, K_1 y K_2 se deberían calcular mediante un método elástico.

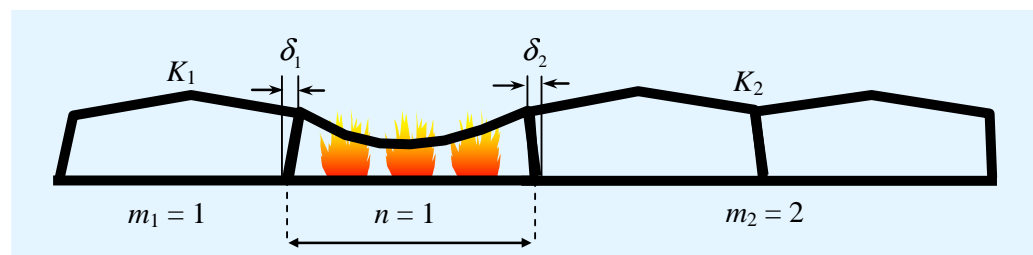


Figura 5.11 Incendio localizado en medio del edificio

Sin embargo, para pórticos habituales de acero (de vano constante, incluso con perfiles de acero estándar iguales de una nave a otra), la rigidez lateral equivalente K_i a cada lado del incendio se puede calcular de forma aproximada en función del número de naves frías en dichos lados (m_i), mediante la siguiente fórmula:

$$K_i = \begin{cases} k & \text{para } m_i = 1 \\ ck & \text{para } m_i \geq 2 \end{cases} \quad (31)$$

con

$$k = \frac{\alpha}{1+2\alpha} \frac{12EI_c}{(h+f)^3}$$

$$c = 1 + \sum_{j=2}^{m_i} \frac{j}{2} \frac{2\alpha+1}{1+2j\alpha} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{I_b}{I_c} \frac{h+f}{l} \left(1 - \frac{f}{0,6h}\right)$$

donde, para cada lado a su vez ($i = 1, 2$):

h es la altura de los pilares

f es la cumbrera

l es la longitud del vano

I_b es el momento de inercia de la viga

I_c es el momento de inercia del pilar

E es el modulo de elasticidad del acero a temperatura normal

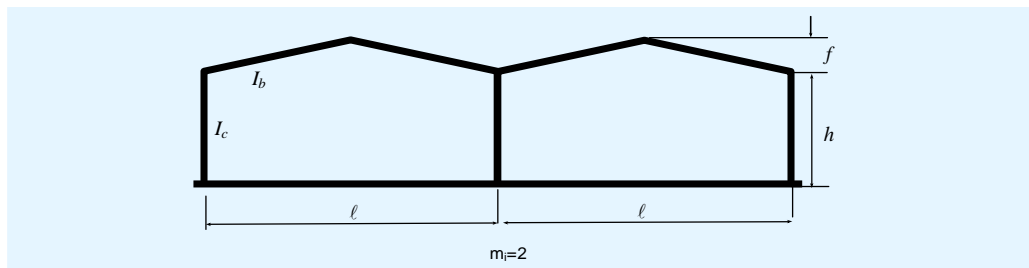


Figura 5.12 Definición de los parámetros en los lados fríos i de la estructura

Rigidez lateral K para un incendio en el extremo de la estructura

Si el compartimento de incendio está en el extremo de la estructura, K_2 se debería calcular de la misma manera que si estuviese en medio del recinto. K_1 , que se define como la rigidez lateral de la estructura de acero del compartimento caliente de incendio, se debería calcular mediante la siguiente expresión:

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{ll} 0,065 k & \text{para } n = 1 \\ 0,13 k & \text{para } n = 2 \\ 0,13 c k & \text{para } n > 2 \end{array} \right\} \quad \text{para pórticos con vigas} \quad (33)$$

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{ll} 0,2 K_2 & \text{para } n = 1 \\ 0,3 K_2 & \text{para } n \geq 2 \end{array} \right\} \quad \text{para pórticos en celosía}$$

donde k y c se calculan mediante la expresión (32) siendo $m_1 = n - 1$, donde n es el número de naves calientes, tal y como se indica en la Figura 5.13.

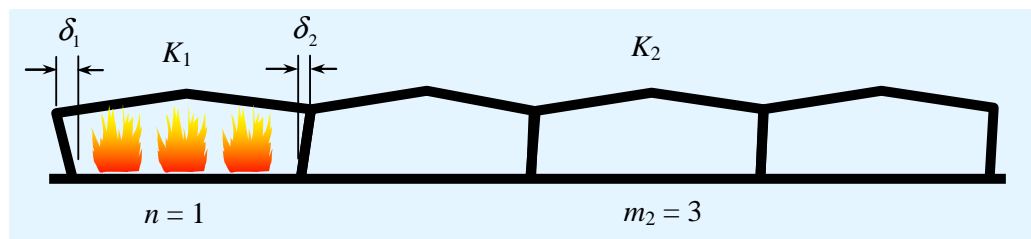


Figura 5.13 Incendio localizado en un compartimento extremo del edificio

5.5.3 Ejemplos de escenarios de incendio

Los cálculos anteriores deben llevarse a cabo para todos los escenarios de incendio posibles. Estos escenarios se definen según la distribución del edificio de almacenamiento (estructura y particiones) tal y como se ilustra en el ejemplo de la Figura 5.14.

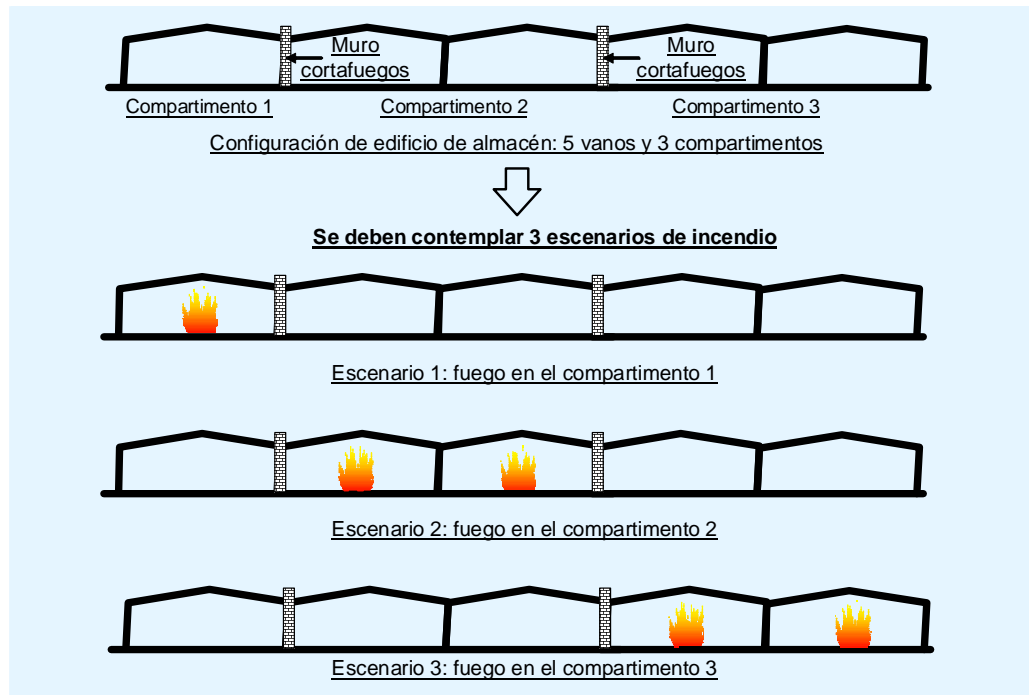


Figura 5.14 Escenarios de incendio según la disposición del edificio

5.6 Recomendaciones de diseño

Con el fin de evitar el colapso hacia fuera del edificio, así como el colapso progresivo de la estructura de acero, es necesario poner en práctica recomendaciones de diseño adicionales para los muros cortafuegos, elementos de fachada y sistemas de arriostramiento. Obviamente las recomendaciones también contemplan el colapso de la estructura de acero en situación de incendio a cualquier lado del muro cortafuegos sin ocasionar daños a éste.

5.6.1 Muros cortafuegos

Con el fin de limitar la propagación del incendio a un compartimento colindante, se puede concebir una solución que exige que el edificio esté subdividido en compartimentos independientes, si se ponen en práctica uno de los siguientes detalles de construcción:

- Dos muros cortafuegos independientes (como paneles de tipo sándwich, paneles prefabricados, etc.), cada uno fijado en una estructura independiente (véase la Figura 5.15 (a)). En este caso, cuando una estructura y su muro cortafuegos colapsan durante un incendio, éste no puede propagarse a la estructura colindante, que sigue siendo estable y protegida del fuego por el segundo cortafuegos.
- Un único muro cortafuegos posicionado entre ambas estructuras. Este muro cortafuegos puede ser un muro con estabilidad propia y totalmente independiente. El muro cortafuegos también puede fijarse por la parte superior a ambas estructuras mediante elementos “fusibles” de atado (véase la Figura 5.15 (b)), que en caso de fuego próximo al muro dejan de estar conectados a la estructura “caliente” (normalmente, cuando los tornillos alcanzan una temperatura entre 100 y 200°C) sin ocasionar daños al muro

(que permanece sujeto a la estructura de acero situada en el lado “frío”) ni perjudicar la estabilidad de la estructura fría colindante.

En la práctica es habitual utilizar muros con estabilidad propia. Sin embargo, durante un incendio esta solución puede entrañar peligro para las personas (los ocupantes y los bomberos), ya que colapsan como consecuencia del efecto de curvatura por causas térmicas. Así, sólo deberían utilizarse si su comportamiento ha sido evaluado mediante un modelo de cálculo avanzado, teniendo en cuenta los efectos de segundo orden. Además, cuando el espacio entre el muro con estabilidad propia y la estructura de acero colindante no es suficiente, resulta importante asegurarse que el muro cortafuegos puede soportar la fuerza inducida por los movimientos del edificio debidos a la dilatación térmica de la estructura de la cubierta (vigas y correas), debido al aumento de la temperatura en el recinto sometido al fuego.

Como alternativa a las soluciones anteriores, se puede introducir el muro cortafuegos en la estructura de acero del edificio de una sola planta tal y como se indica en la Figura 5.15 (c). Dicho muro puede ser, o bien perpendicular a la estructura de acero, o paralelo a ella. De esta forma, son varias las soluciones que se pueden considerar: muro cortafuegos que se introduce en la línea de pilares, muro cortafuegos que se une a los pilares o muro cortafuegos que se desplaza de la línea de pilares. Para llevar a cabo estas soluciones, se deberán tomar las medidas adecuadas para evitar el colapso del muro como resultado de los desplazamientos laterales importantes que podrá sufrir la estructura de acero. Dentro de estas medidas nos encontramos las siguientes:

- La unión de los muros cortafuegos con la estructura de acero
- La protección contra el fuego de la estructura de acero en las proximidades de los muros cortafuegos
- El sistema de cubierta sobre los muros cortafuegos
- El sistema de arriostramiento.

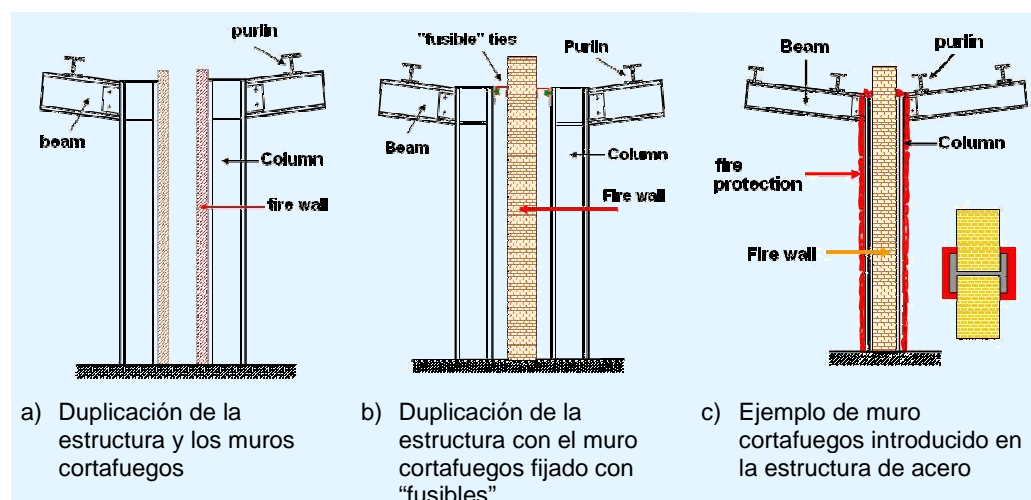


Figura 5.15 Algunas soluciones de muro cortafuegos

Unión de los elementos de fachada y muros cortafuegos a la estructura de acero

Los muros cortafuegos y los elementos de fachada fijados a la estructura de acero de los edificios de una sola planta deben permanecer fijados con firmeza con el fin de evitar cualquier fallo de los mismos como consecuencia de los importantes desplazamientos laterales de la estructura en caso de incendio y así evitar los riesgos de un colapso progresivo, así como de un colapso hacia fuera del edificio.

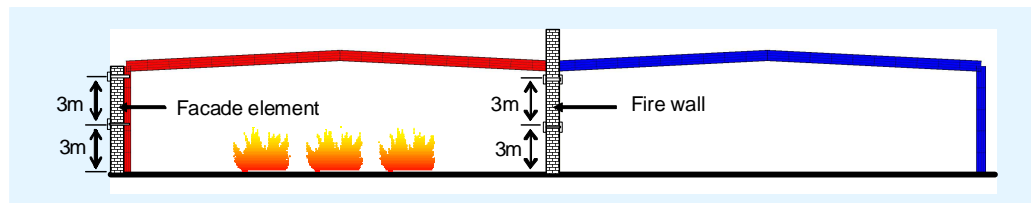


Figura 5.16 Diseño de detalle para elementos de fachada y muros cortafuegos

Una de las soluciones es la unión de estos elementos a los pilares de la estructura portante mediante sistemas de unión adecuados, distribuidos uniformemente por toda la altura del edificio. El espacio máximo de estas uniones vendrá indicado por el fabricante de los muros; se recomienda que no sea superior a 3 m para aquellos muros que se construyan en obra (hormigón, muros de fábrica, etc.).

Además, los elementos de sujeción utilizados para unir los muros cortafuegos y los elementos de fachada a los pilares deben estar diseñados de tal forma que resistan las fuerzas producidas por el viento y el peso propio de los elementos divisorios bajo el efecto del desplazamiento lateral ocasionado por la estructura de acero del edificio. Si estos elementos de sujeción son de acero y no están protegidos contra el fuego, cada uno de ellos debe estar diseñado a temperatura ambiente para resistir la siguiente fuerza:

$$F = W + 5 p \delta_i d / n \quad (34)$$

donde:

- W es la carga característica de viento que se utiliza para diseño a temperatura ambiente aplicada a cada elemento de sujeción [N]
- p es el peso propio del muro [N/m²]
- d es la distancia entre pórticos [m]
- n es el número total de elementos de sujeción (distribuidos de manera uniforme por toda la altura)
- δ_i es el máximo desplazamiento lateral que se obtiene de la relación (26) [m]

Protección contra el fuego de los elementos de acero cercanos a los muros cortafuegos

El requisito que indica que no debería producirse una propagación del incendio entre distintos compartimentos y que no debería haber colapso progresivo (es decir, debería preservarse la condición de la integridad de los muros cortafuegos y las partes frías de la estructura deben permanecer estables), lleva

a otro requisito, que indica que los pilares empleados como soportes de los muros cortafuegos deben alcanzar la misma resistencia al fuego que los mismos muros cortafuegos. En los casos habituales, estos requisitos ante el fuego conllevan la aplicación de una protección contra el fuego de los pilares. Por otro lado, los pilares que no soportan a los muros cortafuegos no requerirán ningún tipo de protección adicional contra el fuego.

Además, los elementos estructurales que podrían dañar a los muros cortafuegos (como las vigas y las correas cercanas a los muros o que los atraviesen) también deberán protegerse.

5.6.2 Recomendaciones para los pórticos de acero

Muro cortafuegos perpendicular a la estructura de acero

La Figura 5.17 muestra un caso en el que el muro cortafuegos es perpendicular a la estructura de acero. En este caso:

- Los pilares que están contruidos dentro del muro o cerca del mismo, deben protegerse contra el fuego.
- Cuando se introduce un muro cortafuegos entre las alas de los pilares, las vigas de cubierta no necesitan ningún tipo de protección adicional contra el fuego (Figura 5.17 (a)).
- Cuando los pórticos no tienen cartelas y el muro cortafuegos está fijado a una de las alas de los pilares, es preciso aplicar la protección contra el fuego en todas las vigas que atraviesen el muro cortafuegos (en la parte interior del muro) en una longitud mínima de 200 mm más allá del límite del muro. Esta protección permite que las rótulas plásticas se desplacen de la posición del muro y se evita así un posible daño sobre el mismo como resultado del colapso de la viga (véase la Figura 5.17 (b)). Cuando los pórticos tienen cartelas, las vigas no necesitan ninguna protección contra el fuego.
- En esta situación, las correas no atraviesan el muro cortafuegos y no se precisan consideraciones particulares.

El espesor del material de protección contra el fuego aplicado a los pilares puede calcularse asumiendo una temperatura crítica de 500°C y la misma resistencia al fuego requerida que los muros cortafuegos. Se deben proteger los pilares contra el fuego en toda su longitud.

Si las vigas están protegidas parcialmente, se puede calcular el espesor del material de protección contra el fuego asumiendo una sección de acero expuesta por sus cuatro lados con el consiguiente factor de forma, una exposición a fuego estándar de una hora y una temperatura crítica de 500°C.

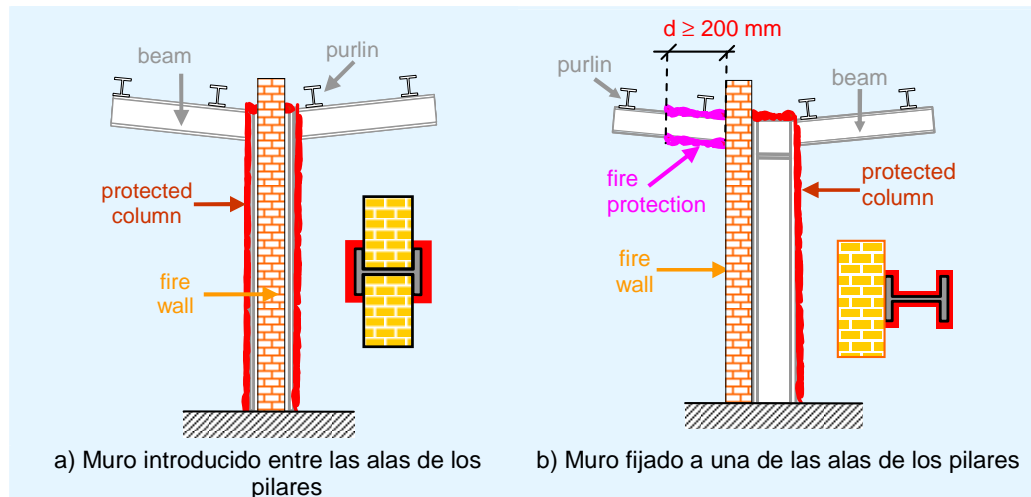


Figura 5.171 Diseño de detalle cerca de un muro cortafuegos perpendicular a los pórticos

Muro cortafuegos paralelo a la estructura de acero

La Figura 5.18 muestra un caso en el que el muro cortafuegos es paralelo a la estructura de acero.

En este caso:

- El muro cortafuegos está situado entre dos pórticos o en el plano del pórtico, entre caras de pilares y vigas.
- Los pilares y vigas que están dentro del muro cortafuegos o cerca de él deben estar protegidos contra el fuego.
- Las correas atravesarán los muros cortafuegos. Por lo tanto, resulta necesario proteger contra el fuego las correas continuas (a más de 200 mm desde el muro) o diseñar un sistema de correas no continuas. Por ejemplo, cuando el muro cortafuegos está en el plano del pórtico, se deberían insertar a través del muro elementos de acero fijados a las vigas para soportar las correas.

Se puede calcular el espesor del material de protección contra el fuego aplicado a los pilares y a las vigas asumiendo una temperatura crítica de 500°C y la misma resistencia al fuego requerida que los muros cortafuegos. Se deben proteger los pilares contra el fuego en toda su longitud.

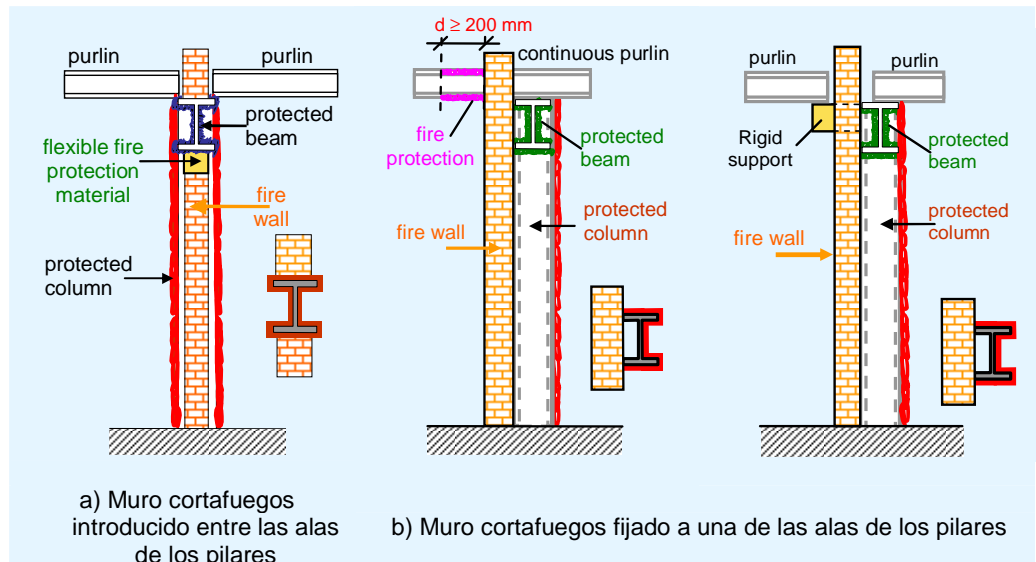


Figura 5.18 Diseño de detalle cerca de un muro cortafuegos paralelo a los pórticos

Si las correas están protegidas parcialmente, se puede calcular el espesor del material de protección contra el fuego asumiendo una sección de acero expuesta por sus cuatro lados con el consiguiente factor de forma, una exposición al fuego estándar de una hora y una temperatura crítica de 500°C.

Recomendaciones de diseño adicionales para pórticos de acero simples

En el caso de edificios de una sola planta con pórticos simples en los que la relación altura de pilar/luz del pórtico (h/L) es superior a 0,4, el modo de fallo hacia fuera puede evitarse si se calculan las uniones entre los pilares y los cimientos (y los propios cimientos), de tal forma que tengan la suficiente resistencia como para soportar las cargas verticales en la situación de incendio, junto con un momento flector adicional equivalente al 20% del momento plástico último del pilar a temperatura normal.

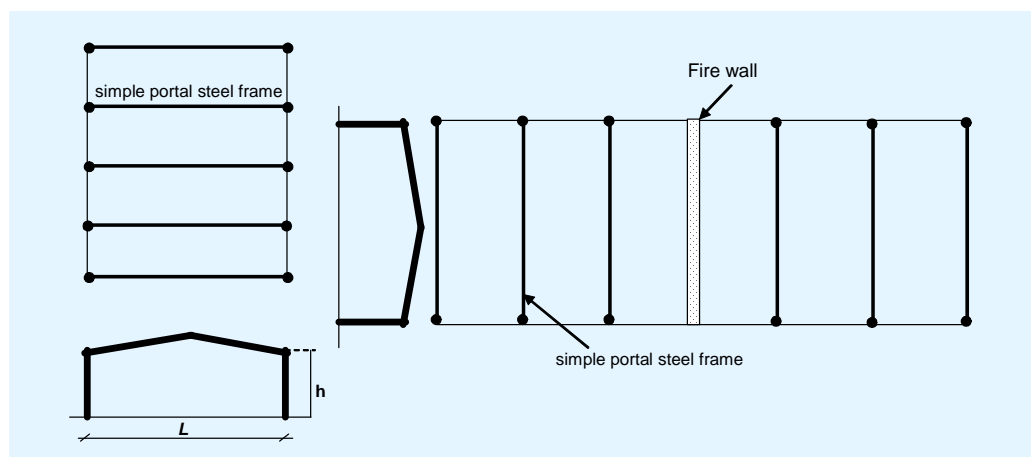


Figura 5.19 Edificios de una sola planta con pórticos de acero simples

Ejemplos de muros cortafuegos

En la Figura 5.20 se muestran ejemplos de muros cortafuegos donde se adoptaron algunas de las recomendaciones anteriores. Se muestra con claridad

que los muros cortafuegos no resultaron dañados, a pesar del colapso de la estructura de acero.



a) Muro cortafuegos con estabilidad propia insertado entre dos estructuras de acero independientes



b) Viga de acero parcialmente protegida contra el fuego que atraviesa un muro cortafuegos fijado a los pilares de acero

Figura 5.20: Fotografía de los muros cortafuegos después de un incendio en un edificio de acero de una sola planta

5.6.3 Recomendaciones para los pórticos de acero con vigas en celosía

Muro cortafuegos perpendicular a la estructura de acero

La Figura 5.21 muestra un caso en el que el muro cortafuegos es perpendicular a la estructura de acero. En este caso:

- Los pilares que están contruidos dentro del muro o cerca del mismo deben protegerse siempre contra el fuego.
- Cuando el muro cortafuegos está introducido entre las alas, las vigas en celosía deberían estar protegidas a ambos lados del muro (véase la Figura 5.21 (a)).
- Cuando el muro cortafuegos está fijado a un ala, sólo las vigas en celosía del lado del muro tienen que estar protegidas. La protección contra el fuego debe aplicarse a las vigas a una distancia mínima equivalente a la distancia que separa el muro del primer elemento vertical de la estructura en celosía (véase la Figura 5.15 (b)).
- Las correas no atraviesan el muro cortafuegos en este caso y no precisan una atención particular.

El espesor del material de protección contra el fuego aplicado a los pilares puede calcularse asumiendo una temperatura crítica de 500°C y la misma resistencia al fuego requerida para los muros cortafuegos. Se deben proteger los pilares contra el fuego en toda su longitud.

Si las vigas en celosía están protegidas parcialmente, el espesor del material de protección contra el fuego puede calcularse asumiendo para el factor de forma: un perfil de acero expuesto en sus cuatro lados para el cordón inferior,

elementos verticales (montantes) y diagonales y en tres lados para el cordón superior. Se puede utilizar una exposición al fuego estándar de una hora y una temperatura crítica de 500°C.

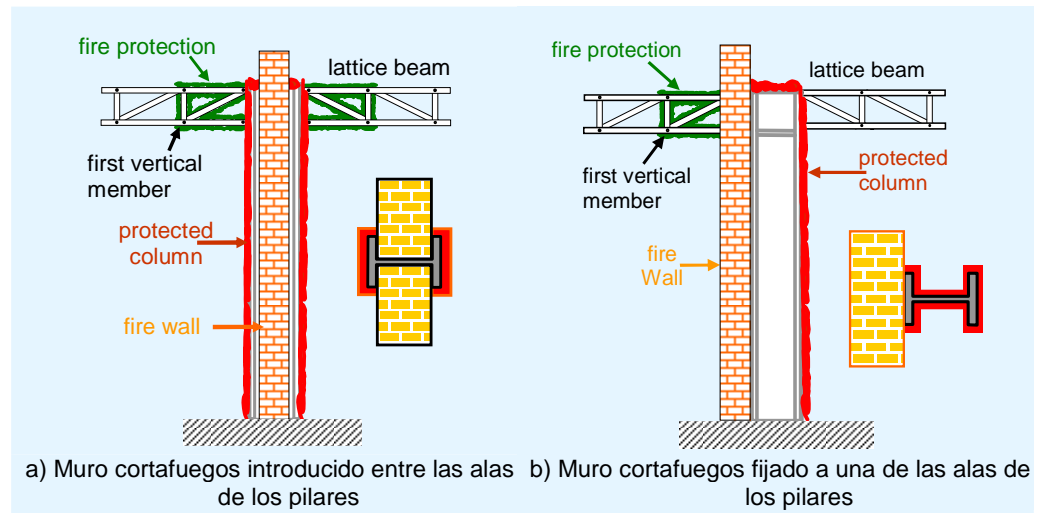


Figura 5.21 Diseño de detalle cerca de un muro cortafuegos perpendicular a los pórticos con vigas en celosía

Muro cortafuegos paralelo a la estructura de acero

La Figura 5.22 muestra un caso en el que el muro cortafuegos es paralelo a la estructura de acero. En este caso:

- No resulta práctico colocar un muro en el plano de un pórtico, ya que resulta difícil que el muro tenga continuidad en todo el canto de la viga en celosía. Los muros cortafuegos que sean paralelos al pórtico, estarán por lo tanto, a un lado y en contacto con la estructura de acero o entre dos estructuras de acero independientes.
- Cuando el muro cortafuegos está unido a la estructura de acero, los pilares y las vigas deben estar protegidos contra el fuego (véase la Figura 5.22 (b)). Además, las correas y estabilizadores deben estar protegidos contra el fuego en una longitud mínima correspondiente a la distancia desde el muro hasta el punto de unión correa/estabilizador cuando la estructura de la cubierta esté realizada con correas.
- Cuando el muro cortafuegos está introducido entre dos estructuras de acero independientes, no se precisa ninguna protección contra el fuego (véase la Figura 5.16 (b)).

Si los pilares están protegidos, el espesor del material de protección contra el fuego aplicado a los pilares puede calcularse asumiendo una temperatura crítica de 500°C y la misma resistencia al fuego requerida que los muros cortafuegos. Se deben proteger los pilares contra el fuego en toda su longitud.

Si las vigas en celosía están protegidas, el espesor del material de protección contra el fuego puede calcularse asumiendo para el factor de forma: un perfil de acero expuesto en sus cuatro lados para los cordones inferiores, elementos verticales (montantes) y diagonales y en los tres lados para los cordones superiores. Se puede utilizar una exposición al fuego estándar de una hora y una temperatura crítica de 500°C. Se deben proteger las vigas en celosía contra el fuego en toda su longitud.

El espesor del material de protección contra el fuego aplicado a las correas y estabilizadores puede calcularse de manera sencilla asumiendo una sección de acero expuesta por sus cuatro lados con el consiguiente factor de forma, una exposición al fuego estándar de una hora y una temperatura crítica de 500°C.

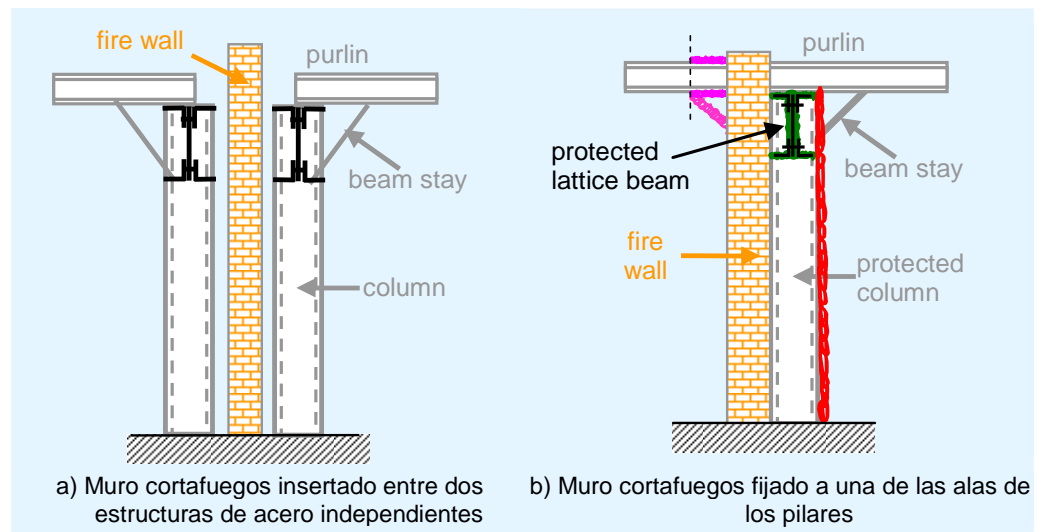


Figura 5.22 Diseño de detalle cerca de un muro cortafuegos paralelo a los pórticos con vigas en celosía

5.6.4 Recomendaciones para el sistema de arriostramiento

El requisito de no colapso hacia el exterior del edificio en dirección longitudinal (perpendicular a las estructuras de acero) puede cumplirse mediante los sistemas de arriostramiento adecuados. Más concretamente, cada compartimento debe contar con su propio sistema de arriostramiento.

Muro cortafuegos perpendicular al pórtico de acero

La Figura 5.23 (a) muestra un caso en el que el muro cortafuegos es perpendicular al pórtico de acero. En este caso:

- Hay que utilizar sistemas de arriostramiento vertical en ambos extremos del muro cortafuegos, para garantizar la integridad del muro. Estos sistemas de arriostramiento deberían estar diseñados para soportar una carga lateral equivalente al 20% de la carga debida a las acciones normales del viento (para la combinación de acciones en situación de incendio), calculada para un área hastial limitada a la anchura entre los soportes hastiales (pilares de cierre frontal).
- Es preciso tener sistemas de arriostramiento dobles (por ejemplo, sistemas de arriostramiento en ambos lados del muro cortafuegos) o proteger el sistema de arriostramiento.
- Los sistemas de arriostramiento deben estar colocados de tal forma que no ocasionen problemas en el diseño a temperatura normal, por ejemplo, si comprometen el movimiento de una junta de dilatación.

Muro cortafuegos paralelo al pórtico de acero

La Figura 5.23 (b) muestra un caso en el que el muro cortafuegos es paralelo al pórtico de acero. En este caso:

- Es preciso instalar sistemas de arriostramiento (arriostramiento vertical y horizontal de cubierta) en cada compartimento. Esta solución puede tener como consecuencia sistemas de arriostramiento adicionales para situaciones normales.
- Es preciso diseñar cada sistema de arriostramiento de tal forma que proporcione la estabilidad adecuada en una situación normal y soporte en una situación de incendio una carga uniforme horizontal [N/m] equivalente a $F = 1,19 \times (G + \psi_1 \times S_n) \times l_f$, donde l_f es el espacio entre pórticos de acero, G es la carga permanente, S_n es la carga de nieve y ψ_1 es el coeficiente de combinación frecuente según el anexo nacional pertinente de la norma EN 1990.
- Cuando el muro cortafuegos esté fijado al ala de los pilares, los elementos de los sistemas de arriostramiento deben fijarse a los elementos de acero rígidos que soportan a las correas que se encuentran en el mismo lado que el muro.

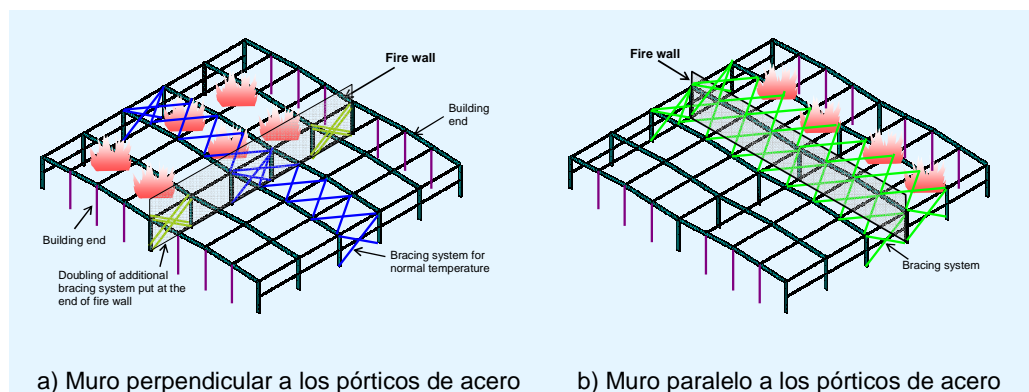


Figura 5.23 Recomendaciones para el sistema de arriostramiento

5.6.5 Recomendaciones para los sistemas de cubierta por encima de los elementos de separación

La cubierta debería ser independiente de un compartimento a otro y seguir las siguientes recomendaciones (véase la Figura 5.24) (a):

- Deberían utilizarse correas a cada lado del muro cortafuegos.
- La cubierta debería interrumpirse a ambos lados del muro cortafuegos.
- La cubierta debería tener una protección contra el fuego de más de 2,50 m de ancho a ambos lados del muro.

Otra solución consistiría en ampliar el muro por encima de la cubierta, hasta una distancia específica d (véase la Figura 5.24 (b)).

La normativa nacional puede especificar otra serie de requisitos especiales para los sistemas de cubierta adyacentes a los muros cortafuegos.

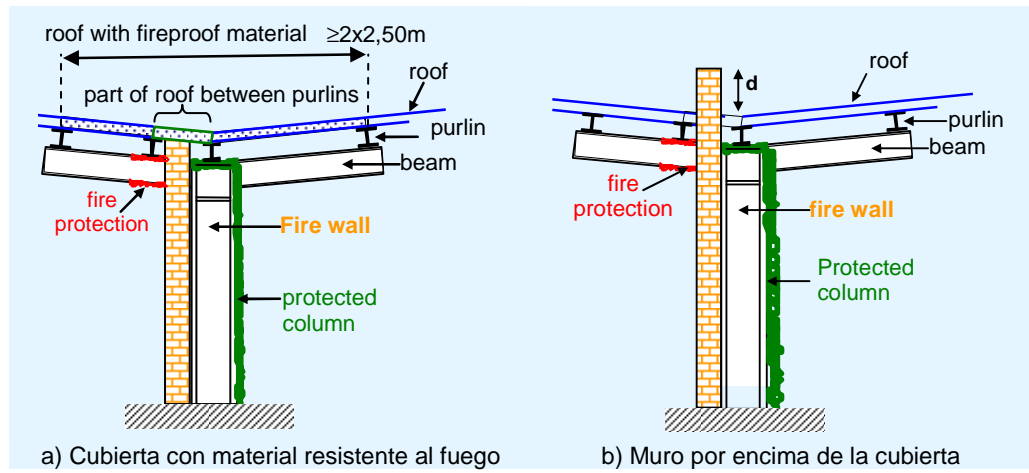


Figura 5.24 Sistema de cubierta por encima de los elementos de separación

6 GUÍA SOBRE EL USO DE SOLUCIONES MÁS AVANZADAS

En este capítulo se ofrece una descripción general de los modelos de cálculo avanzado que existen para establecer la modelización del fuego, modelización térmica y la modelización de estructuras que pueden utilizarse en el cálculo de ingeniería de fuego ^[9,15].

6.1 Modelos de fuego

Existen dos tipos de modelos numéricos para la modelización del desarrollo de incendios reales: modelos de zona y modelos de campo. Estos modelos permiten calcular las temperaturas, el descenso del humo, la propagación de las llamas, el tiempo de flashover y muchos otros efectos.

6.1.1 Modelos de zonas

El modelo más simple es el modelo de una zona para fuegos totalmente desarrollados (fuegos post-flashover), en los que las condiciones dentro del compartimento se estiman como uniformes y están representadas por una única temperatura.

Los modelos de dos zonas pueden emplearse en situaciones pre-flashover, sobre todo en la fase de crecimiento de un incendio. El modelo se basa en la hipótesis de la estratificación del humo, que separa el compartimento del fuego en dos capas claramente diferenciadas: una capa superior caliente (que contiene la mayor parte del calor y el humo del fuego) y una capa inferior fría (que permanece sin humo, relativamente). Un penacho alimenta la zona caliente justo encima del fuego. La temperatura de cada capa se calcula a partir del principio de conservación de la energía; la cantidad de productos de combustión tóxicos en cada capa se calcula a partir de la conservación de las especies químicas y el tamaño de cada zona se calcula a partir del principio de conservación de la masa. Las reglas que rigen la convección en el penacho, el intercambio de calor entre las zonas y el flujo de masa a los compartimentos colindantes a través de las aberturas son sencillas. Como resultado de la simulación se puede conocer en función del tiempo, la evolución de la temperatura del gas en cada una de las dos capas, la evolución de las temperaturas de los muros, la evolución del flujo a través de las aberturas y la evolución del espesor de cada capa. El espesor de la capa inferior, que permanece a una temperatura más bien fría y no contiene ningún producto de combustión, es muy importante para evaluar la admisibilidad del compartimento para los ocupantes. Es frecuente que el efecto local cerca del incendio pueda estudiarse mediante un modelo simple, como la metodología de Hasemi con los modelos de dos zonas. La combinación de ambos modelos permite determinar el campo de temperaturas del gas, cerca y lejos del fuego (véase la Figura 6.1).

Cuando el espesor de la capa inferior es demasiado pequeño en comparación con la altura del compartimento, la asunción de dos zonas no resulta aplicable y entonces resulta preferible optar por el modelo de una zona. Además, si el área

del incendio es grande en comparación con la superficie total, la asunción del modelo de una zona suele ser mejor que el de dos zonas.

Algunos modelos de zona incluyen la posibilidad de pasar de un modelo de dos zonas a un modelo de una zona cuando se dan ciertas condiciones (temperatura, área del incendio y espesor de la capa de humo correspondiente al flashover).

Incluso es posible optar por seguir una estrategia de una o dos zonas durante la duración total de un incendio. Con estas estrategias, la totalidad de la simulación se lleva a cabo teniendo en cuenta una o dos zonas, desde el primer momento hasta el final del cálculo. No se efectúa ningún tipo de modificación respecto a la velocidad de generación de calor, excepto los realizados mediante los modelos de combustión.

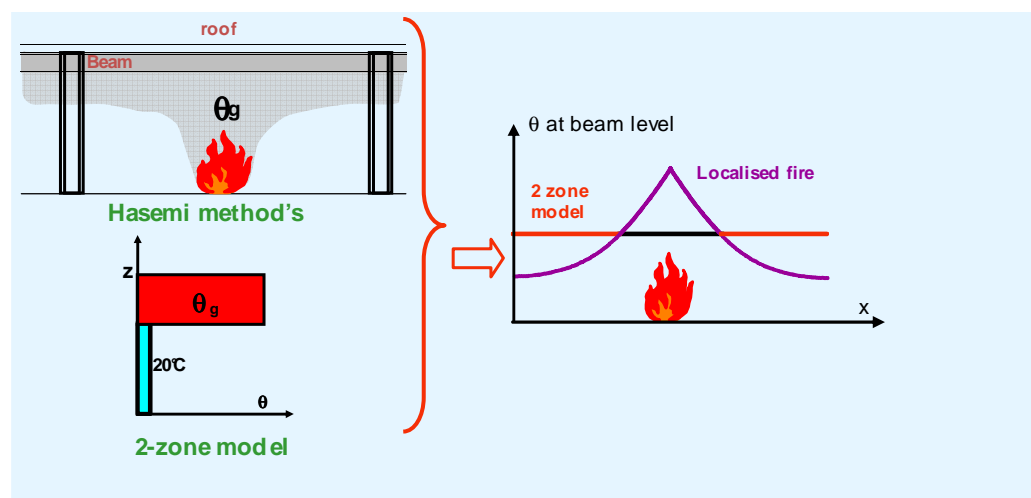


Figura 6.1 Combinación del modelo de dos zonas con el modelo del método de Hasemi

Algunos de los modelos de zona más complejos permiten realizar cálculos de radiación entre la capa superior y los objetos de la estancia. También pueden permitir la existencia de múltiples penachos y el análisis de compartimentos múltiples con intercambio de masa entre cada uno de ellos (véase la Figura 6.2).

Los datos que normalmente han de introducirse son la geometría de la estancia, el tipo de construcción de la misma (incluidos todos los muros, suelos y techos), el número de ventilaciones (u huecos) y sus tamaños, las características del equipamiento de la estancia y los datos del fuego (como por ejemplo, la curva RHR, la velocidad de pirólisis, el calor de combustión del combustible). Los datos que se obtienen suelen ser la predicción del tiempo de activación de los rociadores y el detector de incendios, el tiempo para que se dé el flashover, la temperatura de las capas superior e inferior, la altura de la capa de humo y la producción de especies.

La carga de fuego puede considerarse uniformemente distribuida si el material combustible está presente más o menos por la totalidad de la superficie del compartimento de fuego y cuando la densidad de carga de fuego (cantidad de combustible por m^2 de superficie) es más o menos uniforme. Contrariamente,

la carga de fuego debería ser “localizada” si el material combustible se concentra en una superficie bastante pequeña, en comparación con el resto de superficie que no contiene combustible.

La velocidad de generación de calor constituye un parámetro fundamental en los modelos de fuego avanzados. Para los cálculos, en la práctica se recurre a los valores indicados en la norma EN 1991-1-2.

En edificios con una geometría irregular o compleja, que presenten sistemas de ventilación complejos o en los que sea preciso tener más cuidado en los niveles de exposición de algunas zonas concretas al calor por convección o radiación, debería pensarse en el uso de un modelo de campo.

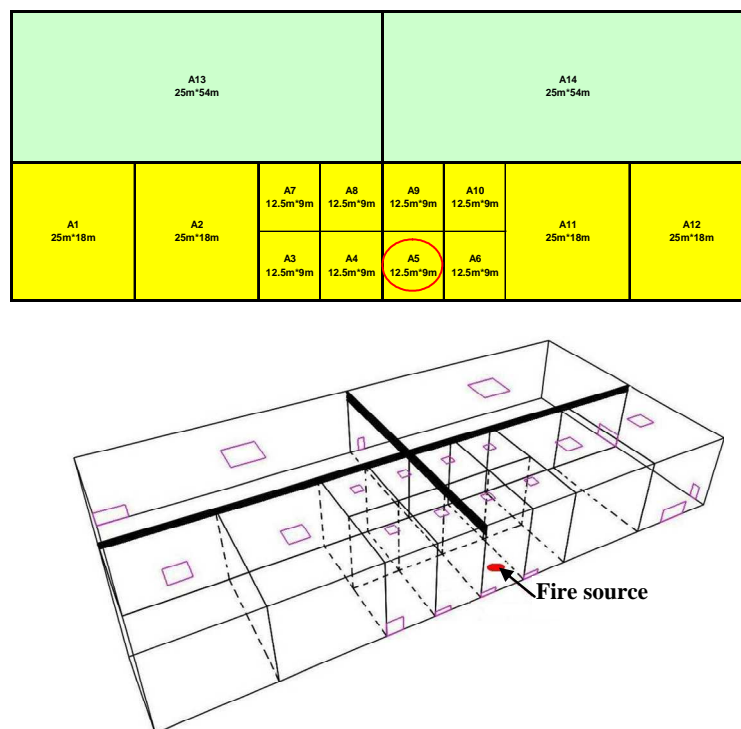


Figura 6.2 Ejemplo de la modelización de incendios utilizando los modelos de zonas en un edificio industrial

6.1.2 Modelos de campo

Los modelos de campo (modelos de dinámica de fluidos computacional) son los modelos deterministas más sofisticados para la simulación de incendios en recintos. Incorporan submodelos para turbulencias, transferencia de calor y combustión.

La técnica de modelos CFD está basada en una solución completa, dependiente del tiempo y tridimensional, de los principios fundamentales de conservación (conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía). El volumen que se tiene en cuenta, normalmente un compartimento de fuego, se divide en un número muy grande de celdas (en ocasiones cientos de miles o incluso millones). El número adecuado aproximado de celdas para el compartimento que se va a estudiar dependerá de la geometría del mismo, la

exactitud requerida y desde un punto de vista práctico, la velocidad y la memoria del computador.

Según el modelo de turbulencia considerado, existen tres tipos de modelos de campo:

- Modelos de simulación numérica directa (DNS): Las ecuaciones básicas se resuelven directamente pero precisa incrementos de tiempo y espaciales muy pequeños para poder simular todas las escalas temporales y espaciales derivadas de los procesos de turbulencia y químicos. Los modelos DNS exigen ordenadores muy potentes y se usan para estudios académicos o se limitan a aplicaciones simples.
- Modelos de simulación de grandes remolinos (LES): Se computan las grandes escalas del flujo (el movimiento turbulento de grandes remolinos), mientras que para el efecto a escalas más pequeñas se utilizan submodelos de filtrado. El submodelo utilizado con más frecuencia es el submodelo de Smagorinsky.
- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS): Estos modelos se basan en la promediación las ecuaciones básicas del fluido y se modelan todas las escalas turbulentas. El modelo usado con más frecuencia es el modelo $k - \varepsilon$.

Los datos de entrada son los mismos que en el caso de los modelos de zona pero tienen que ser introducidos con mayor detalle. Consisten en la geometría detallada de la estancia, el tipo de construcción de la misma (incluyendo todos los muros, suelos y techos), el número de ventilaciones (u huecos) y sus tamaños, las características del equipamiento de la estancia, las características del combustible/combustión, los parámetros de turbulencias y los de radiación.

Los datos que se obtienen son los movimientos del humo y del calor, la predicción del tiempo de activación de los rociadores y el detector de incendios, el tiempo para el flashover, las temperaturas en el dominio considerado, las velocidades, la altura de la capa de humo y la producción de especies.

Debido a su complejidad y al tiempo de CPU necesario, los modelos de campo se utilizan poco para evaluar la resistencia al fuego de las estructuras, sobre todo en los casos de incendios totalmente desarrollados. En el campo de la ingeniería del fuego, el uso de un modelo de campo suele limitarse a casos concretos con una geometría compleja.

6.2 Modelos térmicos

Si se desea calcular la distribución de temperatura en una estructura con fuego, pueden utilizarse los modelos avanzados de transferencia de calor. Se basan principalmente en el método de diferencias finitas o en el método de elementos finitos. Se suelen utilizar para calcular los gradientes de temperatura en los elementos estructurales que están compuestos principalmente de materiales con una baja conductividad térmica y/o un alto contenido en humedad, como el hormigón. Además, pueden aplicarse a los elementos estructurales en condiciones de fuego nominal o de fuego natural.

Dichos métodos deben tener en cuenta la no linealidad debido a la dependencia de la temperatura de las propiedades de los materiales y de las condiciones de contorno. Tal y como se asume habitualmente en el cálculo de un incendio, la transferencia de calor del fuego a las superficies expuestas se da básicamente por convección y radiación. En el interior de materiales homogéneos como el acero, el calor sólo se transfiere por conducción. Por otro lado, en el caso de materiales porosos como el hormigón o en los que existen cavidades internas, la transferencia de calor es más compleja. Los tres procesos: conducción, convección y radiación, pueden darse a la vez, a los que se puede añadir la transferencia de masa. Sin embargo, en aras de simplificarlo, sólo se introduce el proceso primordial de manera explícita en el análisis térmico, teniendo en cuenta los procesos secundarios a través de un ajuste adecuado. En el cálculo a fuego normalmente se parte de la asunción que el hormigón es un material homogéneo y que la transferencia de calor se da principalmente por conducción. La transferencia de calor por convección y radiación que se da en los poros se considera como un proceso secundario y se tiene en cuenta de manera implícita en las propiedades térmicas del hormigón (conductividad, calor específico). Además, la transferencia de masa se suele ignorar por lo general y únicamente se tiene en cuenta la evaporación de la humedad del hormigón. Los efectos de la humedad (asumida con una distribución uniforme en el hormigón) se tratan de manera simplificada, asumiendo que cuando la temperatura en una parte del hormigón alcanza 120°C, la totalidad del calor transferido a esa parte sirve para evaporar el agua. Los movimientos de humedad se modelan en raras ocasiones. En el caso de elementos mixtos, el contacto entre las partes de acero y las de hormigón puede asumirse como perfecto (sin holguras). La radiación en los huecos internos (como por ejemplo, perfiles tubulares) debería tenerse en cuenta en el análisis térmico.

En principio, cuando los efectos de un incendio permanecen localizados en una parte de la estructura, la distribución de temperatura en los elementos estructurales tiene muchas posibilidades de no ser uniforme. Así, un cálculo preciso de las temperaturas debería determinarse mediante un análisis térmico en 3D completo. Sin embargo, debido al prohibitivo tiempo computacional que dicho análisis implicaría, se suele considerar como una simplificación aceptable llevar a cabo una serie de análisis térmicos en 2D en las secciones transversales de los elementos estructurales. Los cálculos se llevan a cabo en la posición correspondiente a lo largo de cada elemento estructural y se obtienen los gradientes de temperatura, asumiendo una variación lineal entre distribuciones 2D de temperatura adyacentes. Este enfoque suele proporcionar una aproximación razonable de la distribución real de temperaturas en los elementos y permite reducir de manera significativa el modelo y el esfuerzo numérico. En el análisis térmico en 2D, las secciones transversales de los elementos se suelen discretizar mediante elementos planos triangulares o cuadriláteros con la funcionalidad de conducción térmica. Por tanto, se pueden modelar todos los perfiles que se utilizan en ingeniería civil. Cada elemento plano que describe la sección transversal puede contener su propio material con características dependientes de la temperatura, como el acero, el hormigón o los materiales de protección.

Las condiciones de contorno pueden ser temperaturas prefijadas o flujos de calor prefijados para simular la transferencia de calor por convección y radiación del fuego a las caras expuestas de los elementos estructurales. Los

efectos de una exposición térmica no uniforme se pueden introducir en el modelo con las condiciones de contorno adecuadas.

Se ignoran los efectos de las deformaciones mecánicas (como el pandeo del elemento de acero, la fisuración y el aplastamiento del hormigón, etc.) por el aumento de la temperatura de los elementos estructurales, algo habitual en la práctica. Por consiguiente, la geometría de los elementos estructurales no varía durante el análisis.

Al igual que en el caso de los modelos simples, el uso de modelos avanzados requiere conocer la geometría de los elementos estructurales, las propiedades térmicas de los materiales (conductividad térmica, calor específico, densidad, humedad...) y los coeficientes de transferencia de calor en el contorno de los elementos (emisividad, coeficiente de transferencia de calor por convección).

Normalmente, en el caso del cálculo a fuego, las propiedades térmicas del material dependientes de la temperatura para el hormigón y el acero se obtienen de las EN 1992-1-2 y EN 1993-1-2 y los coeficientes de transferencia de calor son los indicados en la EN 1991-1-2, respectivamente.

6.3 Modelos estructurales

Los modelos numéricos avanzados para la respuesta mecánica deberían basarse en los principios y asunciones reconocidos de la teoría de la mecánica estructural. Normalmente suelen ser modelos de elementos finitos. Pueden simular una estructura parcial o completa en modo estático o dinámico, proporcionando información sobre los desplazamientos, los estados de tensión y deformación de los elementos estructurales y el tiempo de colapso de la totalidad del edificio en caso de producirse el colapso en el período que dura el incendio. Los cambios de las propiedades mecánicas con la temperatura, así como las propiedades no lineales del material y las no linealidades geométricas, pueden tenerse en cuenta en el comportamiento estructural a fuego. El calentamiento en régimen transitorio de las estructuras durante el fuego se modeliza mediante el uso de procedimientos que proporcionan una solución iterativa paso-a-paso, en lugar de un análisis estacionario.

En este apartado se describen algunas de las principales consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de modelizar el comportamiento de edificios de una sola planta con estructuras de acero o mixtas en situación de incendio, básicamente características relacionadas con los modelos del material, el procedimiento computacional, el modelo estructural, etc.

Se pueden utilizar modelos de cálculo avanzados con cualquier curva de calentamiento, siempre y cuando se conozcan las propiedades de los materiales para el rango de temperaturas considerado y los modelos de los materiales sean representativos de un comportamiento real. A temperaturas elevadas, la curva de tensión-deformación del acero se basa en un modelo lineal-elíptico-plástico, en contraste con el modelo elástico-plástico adaptado para el cálculo de la temperatura normal. Habitualmente se utilizan las relaciones tensión-deformación del acero y el hormigón que se indican en las normas EN 1993-1-2 y EN 1994-1-2.

En una situación de incendio, el campo de temperaturas de los elementos estructurales varía con el tiempo. Como las relaciones tensión-deformación de los materiales son no lineales y dependen de la temperatura, es preciso adoptar un modelo adecuado del material para la simulación numérica avanzada para posibilitar el cambio de una curva de comportamiento a otra, en cada paso-step temporal (y de temperatura). Se suele utilizar el denominado modelo cinemático del material para las estructuras de acero, asumiendo que el cambio de una curva de tensión-deformación a otra debido al cambio de temperatura se hace manteniendo un valor de deformación plástica constante (véase la Figura 6.3). Este modelo se puede utilizar para cualquier estado tensional del acero (tensión o compresión). En el caso del hormigón, resulta mucho más complicado ya que el material tiene un comportamiento distinto a tracción y compresión. Por ello, se precisan distintas reglas de cambio para cuando el material está a tracción o a compresión. En términos generales, el modelo cinemático se utiliza en la mayoría de los modelos de cálculo avanzados para las aplicaciones de ingeniería de seguridad ante incendios.

El comportamiento del acero se suele modelizar con una superficie de fluencia de Von Mises con endurecimiento. El comportamiento del hormigón a compresión se modeliza con una superficie de fluencia de Drucker-Prager, con endurecimiento.

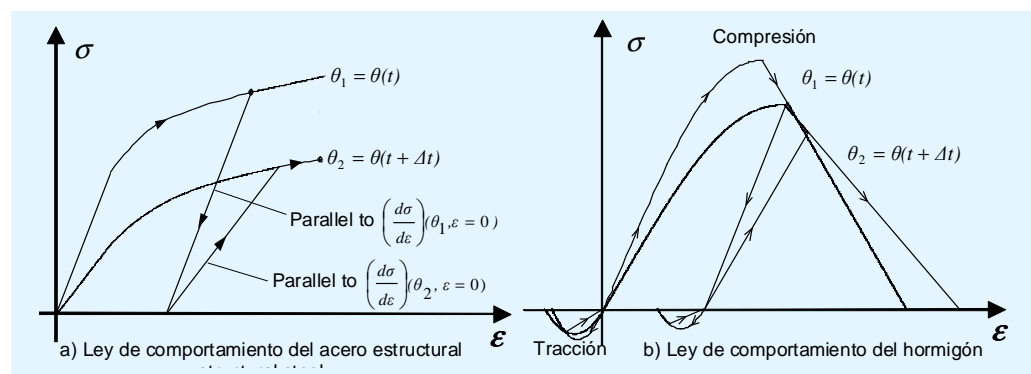


Figura 6.3 Modelo cinemático del material para acero y hormigón

Otro aspecto que hay que tener en cuenta en la aplicación de los modelos de cálculo avanzados para las estructuras de acero y hormigón en condiciones de fuego natural es el comportamiento del material durante la fase de enfriamiento. Es de sobra conocido que para los tipos de acero que se suelen emplear, la variación de las propiedades mecánicas con la temperatura se considera reversible, lo cual quiere decir que cuando se enfrían recuperan sus propiedades mecánicas iniciales. Sin embargo, este fenómeno no se da con el hormigón, cuya composición se verá modificada por completo cuando se caliente a una temperatura elevada. Tras enfriarse, no puede recuperar su resistencia inicial. De hecho, su resistencia puede incluso ser inferior tras enfriarse que a la máxima temperatura.

Se deberían tener en cuenta los efectos de la dilatación térmica. Esto se hace partiendo de la base que la deformación total de los elementos estructurales se describe mediante la suma de sus partes:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + (\varepsilon_\sigma + \varepsilon_c + \varepsilon_{tr}) + \varepsilon_r \quad (30)$$

donde ε_{th} , ε_{σ} , ε_r y ε_c son las deformaciones debidas a la dilatación térmica, las tensiones, tensiones residuales y la termofluencia, respectivamente. ε_{tr} es la deformación debida al régimen transitorio y de calentamiento no uniforme del hormigón (que se suele ignorar).

En los Eurocódigos, la deformación por termofluencia se suele incluir de forma implícita en las relaciones tensión-deformación del acero y el hormigón. Las tensiones residuales suelen ignorarse, excepto en algunos análisis estructurales especiales. La deformación térmica es la dilatación térmica ($\Delta L/L$) que tiene lugar cuando la mayor parte de los materiales se calientan. Las deformaciones térmicas no son importantes para el cálculo a fuego de elementos de acero simplemente apoyados, pero han de tenerse en cuenta en el caso de elementos mixtos, pórticos y sistemas estructurales complejos, sobre todo cuando los elementos están coaccionados por otras partes de la estructura (como por ejemplo, un edificio de una sola planta dividido en compartimentos separados entre sí por muros cortafuegos), ya que las deformaciones inducidas térmicamente, debido al aumento de la temperatura y al diferencial de temperaturas, pueden generar esfuerzos internos adicionales importantes.

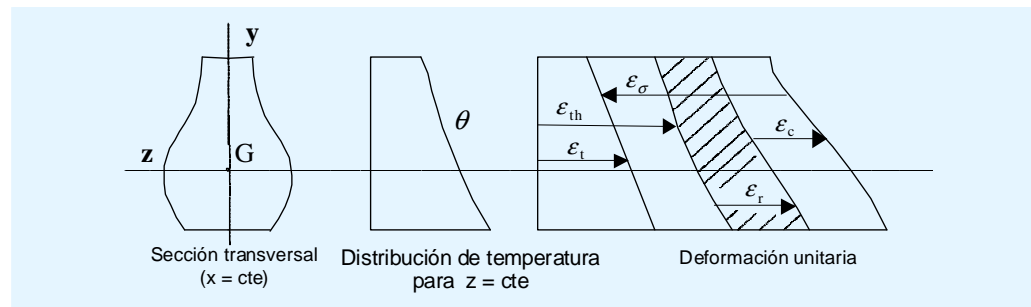


Figure 6.4 Composición de la deformación del material en un modelo numérico avanzado

En general, el análisis estructural en una situación de incendio se basa en el análisis del estado límite último, en el que se da un equilibrio de la estructura entre su resistencia y la carga aplicada. Sin embargo, se dará inexorablemente un importante desplazamiento de la estructura, debido al ablandamiento del material y a la dilatación térmica, resultando en una plastificación importante del material. Por ello, el análisis avanzado a fuego constituye un cálculo elasto-plástico no lineal en el que tanto la resistencia como la rigidez varían de forma no lineal. Desde un punto de vista matemático, la solución de dicho análisis no puede obtenerse directamente, sino mediante un procedimiento iterativo:

- Se lleva a cabo un análisis paso-a-paso con el fin de encontrar el estado de equilibrio de la estructura en diferentes instantes (para diferentes campos de temperatura).
- En cada incremento-paso temporal, se lleva a cabo un procedimiento de solución iterativa para encontrar el estado de equilibrio de la estructura que tiene un comportamiento elasto-plástico.

Normalmente se suelen utilizar diversos tipos de procedimientos de convergencia, como el de Newton-Raphson y el procedimiento Newton-Raphson modificado. El procedimiento de Newton-Raphson está recomendado para estructuras con elementos viga (beam) y el procedimiento Newton-

Raphson modificado se recomienda para estructuras hechas con elementos cáscara (Shell).

Normalmente, el análisis estático basta para modelar el comportamiento de una estructura a fuego. Sin embargo, el fallo local o la inestabilidad de un elemento estructural (como el pandeo lateral de las correas) no desencadena un fallo estructural generalizado. Por ello, el análisis debería llevarse a cabo mediante una sucesión de análisis estáticos y dinámicos para pasar las inestabilidades y para obtener el mecanismo de fallo completo y predecir así la influencia de un fallo local sobre el comportamiento global de la estructura y controlar un posible colapso progresivo. Es preciso recordar que aquí el objetivo no es modelizar con precisión los efectos dinámicos. Así, se pueden utilizar los valores por defecto de los principales parámetros fijados en los modelos para determinar la aceleración y los efectos de amortiguación.

Es preciso representar con exactitud las condiciones de contorno existentes. Es habitual diseñar la estructura asumiendo condiciones de apoyo articulado en las bases de los pilares. Sin embargo, como en la realidad nunca se consiguen bases de pilares totalmente articuladas, también es posible si se dispone de los datos, introducir uniones semi-rígidas. Cuando sólo se modeliza una parte de la estructura, deberían tenerse en cuenta de forma adecuada algunas condiciones de coacción de la parte sin modelizar de la estructura. Las coacciones que se han de aplicar como condiciones de contorno entre la estructura modelizada y el resto de la estructura serán a elección del proyectista. Por ejemplo, en el caso de una condición de simetría, se introducen en el modelo las coacciones de translación en el contorno de simetría y una coacción rotacional en los dos ejes principales en el plano de simetría.

Normalmente, las uniones viga-pilar se consideran totalmente rígidas en el cálculo a fuego de pórticos de acero y mixtos acero-hormigón. Sin embargo, en el caso de pórticos de acero con vigas en celosía, las uniones entre los elementos de las vigas en celosía y las conexiones entre los cordones superiores e inferiores de las vigas en celosía y los pilares, pueden considerarse articuladas o totalmente rígidas, según el tipo de celosías.

Es necesario aplicar dos tipos de acciones a las estructuras calientes. El primero es la carga estática. Debe corresponder a la adecuada en situación de incendio. El segundo tipo consiste en un aumento de la temperatura (por encima de la temperatura ambiente) de los elementos estructurales obtenido a partir del análisis térmico previo. Las condiciones de contorno en los apoyos así como las cargas gravitatorias aplicadas se asume que no varían durante la totalidad de la exposición al fuego.

Es importante elegir una estrategia de modelo estructural adecuada. La simulación del comportamiento mecánico de un edificio de una sola planta en condiciones de fuego se puede hacer mediante un análisis 2D o 3D.

En un análisis 2D, la simulación se lleva a cabo en el plano de cada pórtico, asumiendo un comportamiento tridimensional de la estructura que tenga en cuenta la inestabilidad lateral de los elementos (pilares y vigas). En dicha modelización, es preciso introducir las condiciones de coacción adecuadas para estabilizar la estructura lateralmente. En realidad, estas coacciones fuera del

plano vienen dadas por la estructura de cubierta (como las correas) y por los elementos de fachada fijados en los pilares (muros de hormigón, paneles de tipo sándwich, chapas perfiladas de acero), para que no se dé un colapso fuera de plano.

En un análisis 3D, se modelizan explícitamente varios pórticos paralelos, la estructura de cubierta (correas) y si procede, el sistema de arriostramiento (véase la Figura 6.5). La principal diferencia en el análisis 3D es que los efectos de interacción entre los elementos se tendrán en cuenta directamente; la redistribución de la carga de las partes calientes (partes debilitadas dentro del compartimento de fuego) a las partes frías (partes más fuertes fuera del compartimento de fuego) puede tenerse en cuenta de manera precisa y se podrá analizar el comportamiento global de las estructuras, proporcionando una situación más realista de la respuesta mecánica de las estructuras en caso de incendio. El coste computacional con el análisis tridimensional es alto, debido al importante número de elementos utilizados en el modelo.

La elección entre el análisis 2D y 3D dependerá de diversos parámetros, como el tipo de estructura (pórtico de acero o mixto), las dimensiones del edificio de una sola planta, el escenario de fuego y los objetivos del cálculo estructural a fuego (cumplir un requisito prescriptivo o verificar un modo de fallo).

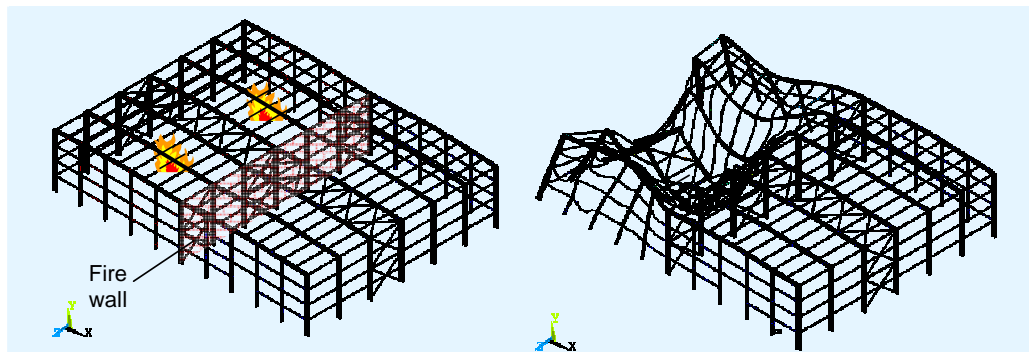


Figura 6.5 Ejemplo de una modelización mecánica 3D

REFERENCIAS

- 1 EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General rules - Actions on structures exposed to fire
- 2 EN 1993-1-2:2003 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design
- 3 EN 1994-1-2:2003 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Actions on structures exposed to fire
- 4 HOCKEY, S.M., and REW, P.J.
Human response to thermal radiation
HSE Books, UK, 1996.
- 5 VASSART, O., CAJOT, L-G., ZHAO, B., DE LA QUINTANA, J.MARTINEZ DE ARAGON, J. and GRIFFIN, A.
Fire Safety of industrial halls and low-rise buildings: Realistic fire design, active safety measures, post-local failure simulation and performance based requirements ECSC research project 7210-PR-378.
- 6 RFCS Research: Fire safety of industrial hall, Design Guide, Arcelor Mittal, CTICM, Labein tecnalia, ULG, Directorate-General for research, Research Fund for Coal and Steel Unit, RFS2-CR-2007-00032, Luxembourg, 2007.
- 7 Report to ECCS: Fire building regulations for single-storey buildings in 9 European countries. Document RT915. Version 02 June 2002.
- 8 LENNON, T., MOORE,D., WANG, B. Y. C. and BAILEY, G.
Designers' Guide to EN 1991-1-2, EN 1992- 1-2, EN 1993-1-2 and EN 1994-1-2 Actions on Structures Exposed to Fire and Structural Fire Design
Thomas Telford, 2007.
- 9 DIFISEK - Dissemination of Structural Fire Safety Engineering Knowledge
ECSC research project RFS-C2-03048.
- 10 PURKISS, J.A.
Fire safety design of structures
Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- 11 Risk Based Fire Resistance Requirements Competitive (RISK -REI), ECSC research project 7210-PR-378.
- 12 SIMMS, W.I., and NEWMAN, G.M.
Single-storey steel framed building in fire boundary conditions (P313)
The Steel Construction Institute, 2002.
- 13 ECCS TC3: Euro-monograms for fire exposed steelwork.
- 14 SD005a-EN-EU, Data: Nomogram for protected members, www.steel-access.com
- 15 FRANSSEN J. M., KODUR V. and ZAHARIA R.
Designing steel structures for fire safety
Balkema Book, 2009.

APÉNDICE A Procedimiento alemán de seguridad ante incendio para edificios de una sola planta industriales y comerciales

En Alemania, los edificios pensados para un uso comercial e industrial deben cumplir la normativa “Musterbauordnung” (MBO) y todas las normativas estatales federales relativas a los edificios “Bauliche Anlagen und Räume besonderer Art und Nutzung” (“Instalaciones estructurales y espacios con requisitos y usos especiales”). En dichos casos, y con el fin de cumplir los requisitos básicos (relativos a la seguridad de las personas, la seguridad pública y la protección del entorno natural), se pueden adoptar soluciones alternativas a las normas estatales federales prescriptivas sobre edificios.

Esta afirmación general tiene que interpretarse en el contexto de requisitos de protección contra el fuego físicos y técnicos para un edificio referidos en “Wohngebäude und vergleichbare Nutzungen” (“usos residenciales y similares”), según las normativas estatales federales sobre edificios. En el caso de usos comerciales e industriales, no es necesario ni adecuado aplicar los requisitos de las normativas estatales federales sobre edificios. En lo que respecta al cumplimiento de los objetivos generales de protección estructural contra el fuego, resulta más importante considerar cada edificio de manera individual.

Se recomienda un procedimiento estándar para evaluar los requisitos, mediante métodos con base científica.

Ya que los edificios industriales se consideran como “Sonderbauten” (“edificios especiales”) según la definición del apartado §51 Abs.1 MBO y no pueden estar exentos de las normativas vigentes, el objetivo de la MIndBauRl (la normativa de construcción técnica) consiste en determinar los requisitos mínimos para la prevención del fuego estructural. La MIndBauRl también se sirve de procedimientos de cálculo según la DIN 18230-1: Protección contra el fuego estructural en edificios industriales – cálculo de resistencia al fuego.

En lo que se refiere al apartado 3 Abs. 3. Satz 3 MBO, que permite variaciones de los estándares de construcción técnica, el procedimiento limita esto a los métodos aceptados para la ingeniería de protección ante incendios y exige que éstos se enumeren de conformidad con el Anexo 1.

El objetivo del procedimiento es regular los requisitos mínimos para la protección al fuego en edificios industriales, en concreto teniendo en cuenta:

- La resistencia al fuego de los componentes y la inflamabilidad de los materiales del edificio
- El tamaño de los sectores de incendio y áreas de actuación de los bomberos
- La disponibilidad, ubicación y recorridos de evacuación

El procedimiento facilitará el diseño a los propietarios de edificios, proyectistas y especialistas. A las autoridades les dará motivos para relajar o desviarse de las normas alternativas aplicables de la MBO. Proporciona a las entidades que controlan y aprueban la construcción de edificios un punto de referencia para

riesgos equivalentes. Se ha establecido un método de cálculo que no requiere ningún análisis de ingeniería de detalle ni ningún cálculo concreto. Esto responde a las responsabilidades jurídicas y ofrece una forma directa de aprobación.

MIndBauRI se aplica a todos los edificios industriales, independientemente de su tamaño. No se aplica a:

- Edificios industriales que sólo se utilizan para almacenar equipamiento técnico o instalaciones y a los que sólo se accede temporalmente con fines de mantenimiento e inspección.
- Edificios industriales que están principalmente abiertos, como por ejemplo, áreas al aire libre cubiertas o almacenes abiertos.
- Edificios que pueden asimilarse a los anteriores desde el punto de vista de su comportamiento en caso de incendio.

Además, el procedimiento no se aplica a las estanterías de almacenamiento de más de 9,0 m de altura (hasta el punto más alto del material almacenado).

Este procedimiento también puede utilizarse para permitir y justificar una relajación de las normativas según el apartado 51 MBO para edificios e instalaciones estructurales, que no están incluidos directamente en el ámbito de MIndBauRI, aunque son comparables a las estructuras industriales respecto al riesgo de incendio.

Se pueden dar motivos para la relajación de las condiciones según el apartado 51 Abs. 1 MBO con uno de los siguientes procedimientos.

- Procedimiento simplificado

En el procedimiento según Abs. 6, la superficie máxima del sector de incendio de una zona en situación de fuego dependerá de la clasificación de la resistencia al fuego de los componentes de apoyo y rigidización, así como de la infraestructura técnica de protección contra incendios.

- Procedimiento de verificación completa

En el procedimiento según Abs. 7, la superficie máxima y los requisitos para los componentes de conformidad con la clasificación al fuego de un sector de incendio se basarán en el procedimiento de cálculo según la norma DIN 18230-1.

- Métodos de ingeniería

En lugar de proceder según los Abs. 6 y 7, también pueden utilizarse métodos estándar de cálculo para ingeniería de protección contra incendios.

La persona que defina el concepto de protección contra incendios que se ha de seguir podrá elegir el método que se pondrá en práctica (Abs. 6 ó 7) al seguir MIndBauRI. Sin embargo, no se pueden combinar los procedimientos.

En lo que a los métodos de ingeniería se refiere, MIndBauRI identifica los principios y condiciones para las hipótesis de dichos cálculos. Regula la verificación y comprobación, así como la documentación.

MIndBauRI, que se ha introducido como norma en la normativa sobre edificios en todos los estados alemanes, resulta aplicable desde el punto de vista jurídico. Dentro de la aplicación de MIndBauRI, hay varios métodos para proceder. Para todas las verificaciones se aplican los mismos requisitos generales; son idénticos para todos los procedimientos y deben ser respetados. Entre ellos se incluyen requisitos de sistemas de agua contra incendios, evacuación de humos, ubicación y accesibilidad, salidas de emergencia y propagación del incendio.

Los requisitos de sistemas de agua contra incendios deben acordarse con el departamento responsable ante incendios, teniendo en cuenta las superficies y las cargas de fuego. Estos requisitos se deberían asumir para durar un período de dos horas.

- Mínimo de 96 m³/h para una superficie de hasta 2.500 m².
- Mínimo de 192 m³/h para una superficie superior a 4.000 m²

Se pueden interpolar, de manera lineal, valores intermedios.

En el caso de edificios industriales dotados de sistemas de extinción automática, una cantidad de agua de al menos 96 m³/h durante una hora es suficiente para extinguir el incendio.

Cualquier fábrica o almacén con una superficie superior a 200 m² debe tener aberturas en los muros o en la cubierta para permitir la evacuación del humo.

Los espacios individuales de más de 1.600 m² deben disponer de una evacuación de humos, para posibilitar las operaciones de extinción del fuego. Esto es así porque se ha probado matemáticamente una capa de humo de 2,5m de altura.

Además de la ubicación y la accesibilidad de cada sector de incendio, al menos uno de los lados tiene que estar situado en una pared exterior y los bomberos tienen que poder acceder a él por ahí. Esto no resulta aplicable a aquellos compartimentos de fuego que están dotados de un sistema de extinción automática.

Las estructuras industriales aisladas y contiguas con más de 5.000 m² tienen que ser accesibles por todos los lados por parte de los vehículos de los bomberos. Estas vías de acceso deben cumplir los requisitos habituales de la brigada ante incendios.

Las vías de acceso para el servicio ante incendios, las áreas de operación y otras vías deberán mantenerse siempre libres. Siempre deberán ser reconocibles fácilmente.

Dentro de las salidas de emergencia en los edificios industriales, se incluyen los pasillos principales del área de producción y las áreas de almacenamiento, las salidas desde estas zonas, las escaleras y las salidas al exterior. Cada estancia con una superficie superior a 200 m² debe tener al menos dos salidas.

En lo que respecta a la longitud máxima permitida para los recorridos de evacuación, el equipamiento y la protección al fuego de la estructura se influyen mutuamente.

La longitud máxima de los recorridos de evacuación está limitada por norma a 35 m para una altura libre de 5 m. Sin embargo, si hay instalado un sistema de detección de incendios, esta longitud aumenta hasta 50 m.

El aumento máximo en cuanto a la longitud con relación a la altura máxima de 50 es de 70 m.

Las distancias se miden como distancias espaciales. La longitud real no debería ser superior a 1,5 veces la distancia espacial que se midió. Hay que tener en cuenta el hecho que desde cualquier punto de la estancia, se debería tardar un máximo de 15 minutos en alcanzar cualquier galería principal.

En caso de incendio, las cubiertas contribuyen de manera importante a la propagación del mismo; el daño dependerá del tipo de medidas preventivas de fuego estructurales que se hayan tomado para la cubierta.

Respecto a la propagación en caso de un incendio desde la zona inferior, son habituales los siguientes mecanismos de fallo:

- El “Durchbrand”. Este es el peor de los casos, cuando el fuego se propaga por la cubierta y después se propaga hacia abajo a otras áreas a través de las aperturas existentes en la cubierta.
- Fallo de la cubierta portante por deslizamiento de los apoyos, por ejemplo en el caso de grandes luces.
- Propagación del incendio bajo cubierta.
- Propagación del incendio por dentro de una cubierta. Esto es muy peligroso ya que no se verá desde abajo. Resulta primordial cuando los servicios de bomberos están luchando contra el fuego en el origen del mismo y de repente empieza a arder detrás de ellos.

Tabla 0.1 Tamaño de los sectores de incendio

Categoría de seguridad	Tamaño máximo del sector de incendio (m ²)	
	Sin requisito de resistencia al fuego “R0”	Con requisito de resistencia al fuego “R30”
K1 Sin requisitos	1800*	3000
K2 Detección de incendios	2700*	4500
K3 Servicio de rescate	3200 - 4500*	5400-7500
K4 Extinción de incendios (Sistema de rociadores)	10000	10000

* área de extracción de calor $\geq 5\%$ y anchura del edificio ≤ 40 m

El método simplificado se basa en la relación entre la superficie permitida del sector de incendio y la categoría de seguridad, el número de plantas y la clasificación al fuego de los componentes.

La superficie se indica en la Tabla A.1 y se encuentra adecuadamente dentro de las medidas de seguridad extremas.

En el caso de edificios industriales con un sistema de rociadores (categoría de seguridad K4), se puede tener una superficie máxima de sector de incendio de 10.000 m² sin requisitos de resistencia al fuego de los componentes estructurales.

Las superficies de hasta 1.800 m² sin ningún requisito de resistencia al fuego, pueden dejarse sin proteger.

En el caso de edificios industriales que no pueden evaluarse mediante el procedimiento simplificado, el proceso de verificación completa se basará en la norma DIN 18230-1.

En primer lugar, se determina el tiempo equivalente para la duración del incendio utilizando este método. Con el tiempo equivalente, se establece una relación entre los efectos de un incendio de un fuego natural y la “Einheitstemperaturzeitkurve” (ETK, curva estándar de tiempo-temperatura). La equivalencia hace referencia a la temperatura máxima de los componentes estructurales en un incendio natural.

Una vez que se ha determinado el tiempo equivalente, existen dos métodos disponibles.

El primero consiste en determinar las superficies máximas en base a lo indicado en la Tabla A.2. No se precisan requisitos de resistencia al fuego de los componentes estructurales cuando se usa esta tabla.

El segundo método precisa algo más de esfuerzo. En primer lugar, se calcula la superficie máxima mediante una fórmula. En este procedimiento, hay que probar la clasificación de la resistencia al fuego de los componentes estructurales. Esto se consigue con la resistencia al fuego necesaria.

Tabla 0.2 Superficie máxima (m²) con relación a la categoría de seguridad y el tiempo equivalente.

Categoría de seguridad	Tiempo equivalente			
	15	30	60	90
K1 Sin requisitos	9000*	5500*	2700*	1800*
K2 Detección de incendios	13500*	800*	4000*	2700*
K3 Servicio de rescate	1600-22500*	10000-13500*	5000-6800*	3200-4500*
K4 Extinción de incendios (Sistema de rociadores)	30000	20000	10000	10000
Área de extracción mínima de calor	1	1	3	4
Anchura máxima del edificio	80	60	50	40

En la Tabla A.2, se puede definir la superficie máxima admisible con relación a la categoría de seguridad y el tiempo equivalente. Además, se puede identificar la superficie de extracción de calor correspondiente indicada como un porcentaje de la superficie y la anchura máxima correspondiente del edificio.

Si se utiliza el segundo método para el procedimiento de verificación completa, se calcula la superficie máxima (m²) mediante el valor base de una superficie de 3.000 m² y los factores F1 a F5.

$$A = 3000 \times F1 \times F2 \times F3 \times F4 \times F5$$

donde:

- F1 tiempo equivalente
- F2 la categoría de seguridad
- F3 la altura de las plantas más bajas
- F4 el número de plantas
- F5 el tipo de aberturas en las plantas

La suma de la superficie total no deberá ser superior a 60.000 m².

Según la Tabla A.2, cuando se utiliza el procedimiento simplificado para los componentes estructurales sin requisitos, el resultado es una superficie máxima posible de 10.000 m².

Cuando se utiliza el procedimiento de verificación completa según esta tabla, es posible una superficie máxima de 30.000 m². Cuando se utiliza el procedimiento de verificación completa además del cálculo de la resistencia al fuego, entonces es posible una superficie de 60.000 m².

En condiciones muy especiales, se pueden obtener superficies más grandes, de hasta 120.000 m².

Ejemplo:

El procedimiento y las posibilidades asociadas con MIndBauRI pueden explicarse mejor con un ejemplo:

Parámetros del edificio

Longitud: 100 m

Anchura: 50 m

Altura media: 6 m

Tamaño: 5.000 m²

Número de plantas: 1

Aberturas en la cubierta: 135 m²

Puertas, ventanas: 132 m²

Carga de fuego: $q_R = 126 \text{ kWh/m}^2$

Sistemas de detección automática de incendios: Categoría de seguridad K2

Sin muros cortafuegos interiores

La primera posibilidad es utilizar el método simplificado según la Tabla A.1. El edificio industrial debe estar equipado con rociadores automáticos para cumplir las condiciones anteriores.

Con el fin de aplicar el método de verificación completa, se debe determinar en primer lugar el tiempo equivalente de duración de incendio. En este caso, es necesario el factor de extracción de calor w . El factor de extracción de calor se determina teniendo en cuenta las superficies correspondientes de aberturas. Las superficies relativas de aberturas son valores auxiliares. Es sólo una cuestión de dividir las aberturas de la cubierta entre la superficie de planta y después las aberturas de las paredes entre la superficie de planta.

- Determinación de la superficie relativa de aberturas horizontales a_h :

$$a_h = A_h / A = 135 \text{ m}^2 / 5000 \text{ m}^2 = 0,027$$

- Determinación de la superficie relativa de aberturas verticales a_v :

$$a_v = A_v / A = 132 \text{ m}^2 / 5000 \text{ m}^2 = 0,026$$

Los valores de las superficies relativas de aberturas se introducen en la Figura A.1, obteniéndose el valor w_0 . En la Figura A.2 se considera la altura de la nave.

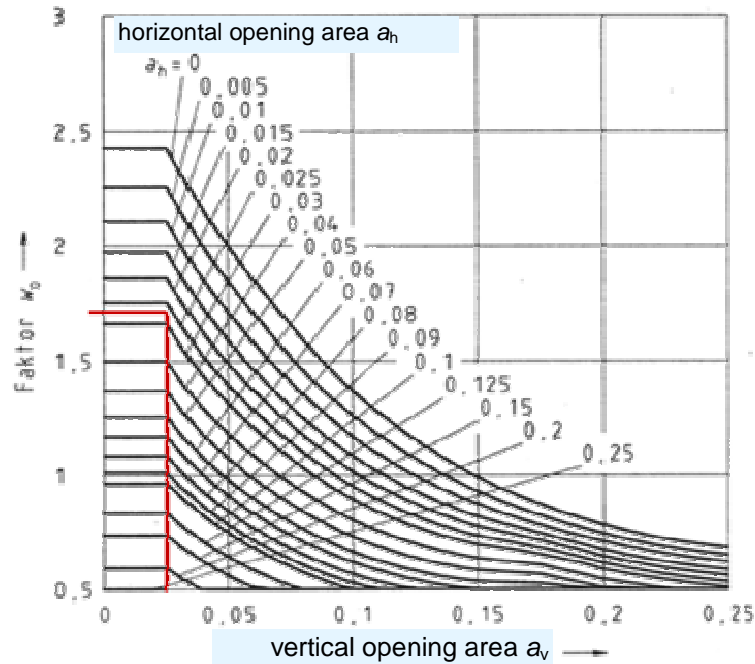


Figura 0.1 Factor w_0 según el área de aberturas

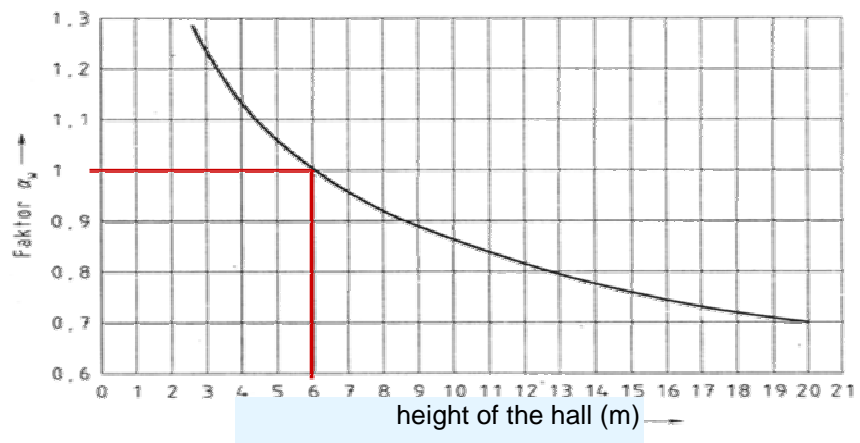


Figura 0.2 Factor α_w según la altura de la nave

El valor de extracción de calor del edificio es:

$$w = w_0 \times \alpha_w = 1,70 \times 1,0 = 1,70$$

El tiempo equivalente ($t_{\text{ä}}$) se basa en los siguientes factores: la densidad de carga de fuego, el factor de extracción de calor y un factor c que tiene en cuenta la superficie de extracción de calor de los elementos de construcción periféricos. En este ejemplo, se otorga a c , por simplificar, el peor valor.

$$t_{\text{ä}} = q_R \times c \times w = 126 \times 0,25 \times 1,70 = 54,0 \text{ min}$$

Mediante interpolación en la Tabla A.2, en la categoría de seguridad K2 y para un tiempo equivalente de 54 minutos, se puede definir una superficie máxima

de 4.800 m². Llegados a este punto, resultaría útil que el proyectista llevase a cabo alguna tarea adicional y revisase los datos introducidos. ¿Es la carga de fuego considerada demasiado elevada? ¿Qué pasará cuando se modifiquen las superficies de aberturas y la superficie de planta al mismo tiempo? Alternativamente ¿Qué pasa con las superficies? ¿Puede reducirse la superficie en 200 m²? Es responsabilidad del proyectista presentar y explicar las diferentes posibilidades al cliente y realizar una comparativa de costes.

La segunda posibilidad utilizando el método de verificación completa es más precisa. La superficie máxima se calcula mediante el valor básico de superficie de 3.000 m² multiplicada por los factores F1 a F5. Los valores de los factores se toman de las tablas de la DIN 18230-1 y no tienen que determinarse.

Según la tabla 3 de la DIN 18230-1 el factor F1 es: 1,9

Según la tabla 5 de la DIN 18230-1 el factor F2 es: 1,5

Según la tabla 6 de la DIN 18230-1 el factor F3 es: 1,0

Según la tabla 7 de la DIN 18230-1 el factor F4 es: 1,0

Según la tabla 7 de la DIN 18230-1 el factor F5 es: 0,7.

Si se incluyen en la fórmula:

$$A = 3000 \times F1 \times F2 \times F3 \times F4 \times F5 = 3000 \times 1,9 \times 1,5 \times 1,0 \times 1,0 \times 0,7$$

$$A = 5989 \text{ m}^2.$$

En este método, se tiene que calcular la clasificación de la resistencia al fuego de los componentes estructurales mediante la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo requerido de resistencia al fuego } t_f = t_a \times \gamma \times \alpha_L$$

El cálculo del tiempo requerido de resistencia al fuego incluye los siguientes factores:

- El tiempo equivalente de 54 minutos
- El factor de seguridad γ de 0,6 según la Tabla 2 de la DIN 18230-1
- El factor alpha L tiene en cuenta la infraestructura relacionada con la seguridad ante incendio y tiene un valor de 0,9 según la Tabla 4 de la DIN.

$$\text{Por lo tanto: } t_f = 54 \times 0,6 \times 0,9 = 29,16 \text{ min} \Rightarrow \text{R30}$$

Tabla A.3 Resumen de la superficie máxima de los sectores

Categoría de seguridad	Área calculada según el método simplificado (m ²)	
	Sin requisito de resistencia al fuego	Con requisito de resistencia al fuego
K1		
K2	2700	4500
K3		5400-7500
K4	10000	
	R0	R30

En la Tabla A.3 se puede consultar una comparativa de estos métodos, las opciones disponibles y las responsabilidades del proyectista. Con el fin de considerar el edificio industrial como un único sector de incendio sin requisitos para la estructura portante, es necesario instalar un sistema automático de rociadores cuando se utilice el método simplificado. Cuando se utilice el método de verificación completa y se respeten las condiciones dadas, es posible tener un sector de incendio de 4.800 m². Para obtener un sector de incendio de 5.000 m², al menos debe existir una planta de servicio anti-incendios.

Con un requisito de resistencia al fuego de R30 para la estructura portante, se requiere al menos un servicio ante incendios para el método simplificado (según la tabla). Con un sistema de detección de incendios, sin embargo sólo es posible un sector de incendio de 4.500 m². Con el método de verificación completa, es posible un sector de incendio de 5.989 m².

Basándose en los resultados de los distintos métodos, la tarea del proyectista está claramente definida. Además de desarrollar un concepto de protección contra el fuego, tiene que presentar al cliente procedimientos alternativos y más económicos con relación a los distintos procesos de producción.