6

Protección:
Incendio

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 6

PROTECCIÓN: INCENDIO

Lección 6.1: Introducción a la Seguridad ante el incendio 1

1 APROXIMACIÓN GLOBAL A LA SEGURIDAD FRENTE A UN INCENDIO 4

1.1 Pérdidas debidas a los incendios 4

1.2 El riesgo de incendio 5

1.3 Objetivos de la seguridad frente a los incendios 6

1.4 Distintos enfoques para la seguridad ante un incendio 7

1.4.1 Enfoque estructural para la seguridad en un incendio 8

1.4.2 Enfoque de vigilancia 9

1.4.3 Enfoque de extinción 10

1.5 Efectividad económica 10

2 REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL DURANTE UN INCENDIO DE LOS ELEMENTOS CARGADOS 12

2.1 Requerimientos de resistencia frente al incendio actuales: Método de Evaluación 1 12

2.2 Requerimientos de resistencia basados en la T- equivalente = Método de Evaluación 2 13

2.3 Métodos de cálculo basados en incendios reales = Método de Evaluación 3 14

2.3.1 Introducción 14

2.3.2 Incendios compartimentados = Métodos de Evaluación 3a 15

2.3.3 Modelos de incendio = Método de Evaluación 3b 15

2.4 Algunas reflexiones sobre los requerimientos de resistencia durante un incendio cuando se usan medidas de protección activas 16

3 RESUMEN FINAL 18

4 BIBLIOGRAFÍA 18
5 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 19

Lección 6.2: Principios de Análisis Termodinámico 21

1 INTRODUCCIÓN 24
2 ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR 26
3 CALENTAMIENTO DE SECCIONES DE ACERO 27
4 RESPUESTA TÉRMICA DE ELEMENTOS MIXTOS DE ACERO Y HORMIGÓN 31
4.1 Introducción 31
4.2 Respuesta térmica de pilares mixtos 31
4.3 Respuesta térmica de forjados mixtos 32
5 RESUMEN FINAL 34
6 BIBLIOGRAFÍA 34
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 34

Lección 6.3: Principios de Análisis Estructural 35

1 INTRODUCCIÓN 38
2 CARGA APLICADA 39
3. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DURANTE UN INCENDIO 40
4 CAPACIDAD RESISTENTE DE LOS ELEMNTOS ESTRUCTURALES 41
4.1 Elementos sometidos a tracción 41
4.2 Pilares 41
4.3 Vigas 42
4.3.1 Vigas simplemente soportadas 42
4.3.2 Viga contínua 42
4.4 Viga pilar 43
4.5 Parámetros principales 43
4.6 Elementos de acero con una distribución de temperaturas no uniforme 43

5 CAPACIDAD RESISTENTE DE ELEMENTOS MIXTOS 45
5.1 Viga mixta 45
5.2 Forjados mixtos 46
5.3 Pilares mixtos 46
6 CONEXIÓN ENTRE ELEMENTOS 48
7 RESUMEN FINAL 49
8 BIBLIOGRAFÍA 49
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 49

Lección 6.4: Métodos Prácticos de Alcanzar la Resistencia al Incendio 51

1 INTRODUCCIÓN 54
2 ESTRUCTURAS NO PROTEGIDAS 56
3 ESTRUCTURAS DE ACERO PROTEGIDAS 57
4 CONSTRUCCIÓN MIXTA 61
5 SECCIONES DE ACERO PARCIALMENTE EXPUESTAS 63
6 PROTECCIÓN MEDIANTE PANTALLAS 64
7 ESTRUCTURA EXTERIOR 65
8 REFRIGERACIÓN POR CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA 66
9 RESUMEN FINAL 67
10 BIBLIOGRAFÍA 67
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 67

Lección 6.5: Ejemplos de cálculo 69

EJEMPLO 1: TEMPERATURA CRÍTICA DE UN ELEMENTO CARGADO 72
EJEMPLO 2: TEMPERATURA CRÍTICA DE UNA VIGA 73
EJEMPLO 3: TEMPERATURA CRÍTICA DE UNA COLUMNA 74
EJEMPLO 4: PROTECCIÓN FRENTE AL INCENDIO DE VIGAS DE ACERO 75
EJEMPLO 5: MOMENTO RESISTENTE DE UNA VIGA MIXTA 76
EJEMPLO 6: TEMPERATURA EQUIVALENTE DE UN INCENDIO REAL 78

ESDEP TOMO 6
PROTECCIÓN: INCENDIO

Lección 6.1: Introducción a la Seguridad ante el Incendio

OBJETIVOS/CONTENIDO

Se introducirá una aproximación global a la seguridad ante los incendios. Se dará un repaso general de los métodos de análisis de la resistencia ante un incendio de elementos sometidos a cargas.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Ninguno.

LECCIONES AFINES

Lección 6.2:	Principios de Análisis Termodinámico
Lección 6.3:	Principios de Análisis Estructural
Lección 6.4:	Métodos Prácticos de Lograr la Resistencia contra el Incendio

RESUMEN

Con el objetivo de presentar el concepto de seguridad ante un incendio, que tenga en cuenta los aspectos estructurales, de detección y de extinción, se describirán las pérdidas durante un incendio, la probabilidad o riesgo de un incendio y los objetivos de la seguridad ante un incendio. Se investigará la eficiencia económica y se presentarán los distintos enfoques de evaluación de la resistencia estructural ante un incendio. También se describirán los efectos de las medidas activas de protección frente a incendios.

1. APROXIMACIÓN GLOBAL A LA SEGURIDAD FRENTE A UN INCENDIO

1.1 Pérdidas debidas a los incendios

Una investigación a escala internacional sobre las pérdidas ocasionadas por incendios arroja los siguientes resultados:

Perdidas humanas: 4 a 34 muertes por millón de habitantes.

Pérdidas económicas: 1,6 a 5,9 0/00 del PIB (Producto Interior Bruto).

Para obtener una perspectiva global sobre el riesgo de pérdidas humanas en incendios en edificios es interesante comparar las estadísticas con otras causas de accidentes mortales:

Actividad	Accidentes mortales por persona, para una media estimada de vida de 70.
Motocicletas (G.B.)	4,1
Vuelos regulares (EE.UU.)	1,5
Media por enfermedad (EE.UU.)	0,7
Conducir un coche (EE.UU.)	0,6
Conducir un coche (G.B.)	0,4
En casa - media (excluida enfermedad)	0,02
En casa - sobre total de personas no disminuidas	0,01
Incendios en hoteles (G.B.)	0,01
Incendios en casas particulares (G.B.)	0,001
Desastres naturales (EE.UU.)	0,0001

Tabla 1 Comparación de estadísticas de defunciones debidas a diferentes causas accidentales. Fuentes [1] [2] [3])

A pesar de que el riesgo de pérdida de vidas en incendios es muy bajo en comparación con otras causas de muertes, existe una tendencia a que los incidentes que provocan muertes múltiples, es decir, alrededor o por encima de 5 defunciones, tengan un eco muy importante en diarios y en la opinión pública. Comparten esta consideración con actividades como el transporte aéreo o los terremotos.

Un desglose de las defunciones debidas a incendios, atendiendo a su localización, muestra que entre el 80 y el 85% de las muertes que se producen en casas particulares y tan solo un 10% en edificios públicos. Por otra parte, aproximadamente el 95% de todas las muertes se deben principalmente al humo y muy pocas a las temperaturas alcanzadas.

Una investigación sobre los incendios no domésticos en Holanda y Francia demuestra que las pérdidas económicas en los contenidos superan las pérdidas las sufridas en los propios edificios [4]

Pérdidas en los contenidos	43%)
Pérdidas asociadas o consecuentes	6%)4/5
Pérdidas de los mismos edificios	21%)1/5

Esto indica que el daño ocasionado al contenido y las pérdidas consecuentes, son más significativos que los daños a los propios edificios.

El coste global de los incendios en Europa incluye las siguientes partidas:

(en 0/00)

- pérdidas en los edificios y en sus contenidos 2 - 5
- pérdidas asociadas 0.2 - 3
- muertes 0.3 - 2

- costes de los servicios de incendios 1 - 3
- costes administrativos de los seguros de incendios 1 - 3
- costes en investigación y concienciación 0.1 - 0.5
- costes de las medidas de seguridad instaladas en edificios 2 - 5

y varían entre el 1.3 y el 2% del P.I.B.. El último punto, es decir, el coste de las medidas de seguridad, representa, como media, entre el 1 y el 3% del total de los costes del edificio. En la mayoría de los países un desembolso importante en medidas de seguridad conlleva una reducción de las pérdidas, tanto directas como indirectas y de vidas humanas . A pesar de ello es de máxima importancia analizar la efectividad económica de estas medidas, o en otras palabras, los frutos aportados por cada inversión en cada una de las medidas de protección adaptadas. Esto se hará en el apartado 1.5.

1.2 El riesgo de incendio

El medio más usual de cuantificar el riesgo de incendio se expresa de la siguiente manera:

$$R_{incend.} = P \times L_{ext}$$

donde $R_{incend.}$ = Riesgo de incendio

P = la probabilidad de ocurrencia de un incendio

L_{ext} = extensión probable del total de perdidas.

$R_{incend.} < R_{aceptada}$

$R_{aceptada}$ representa el riesgo admisible, que varía en cada país.

El riesgo R nunca puede ser nulo y es necesario aceptar un cierto nivel de riesgo para cada tipo de edificio y uso del mismo. Este nivel dependerá del número de habitantes, su facilidad para evacuar el edificio y el valor de los bienes expuestos al incendio.

La tabla 2 suministra algunas indicaciones sobre la ocurrencia de incendios en diferentes tipos de edificios.

Distintos usos del edificio	Fuente	Número de incendios por millón de m^2 superficie en planta y por año
INDUSTRIAL	Gran Bretaña [5] Alemania [6] CIBW 14 [7]	2 2 2
OFICINAS	Gran Bretaña [5] EE.UU. [8] CIBW 14 [7]	1 1 0.5 + 5
HOGARES	Gran Bretaña [5] Canada [9] Alemania [10] CIBW 14 [7]	2 5 1 0.05 + 2

Tabla 2 Probabilidad de ocurrencia de un incendio

La extensión probable de las perdidas varía con el uso del edificio, y es una función del grado de compartimentación, tipo de edificio, distribución de las unidades de alarma y extinción (rociadores/CO2/Halón), resistencia estructural al incendio y de la actuación de los bomberos.

La probabilidad de que un incendio se propague sin control está fuertemente relacionada con el tipo de medidas activas de protección

disponibles, tal y como se indica en la tabla inferior (tomada de la referencia CIB W14 Workshop “Structural Fire Safety” [7]).

Tipo de medidas activas	Probabilidad de propagación incontrolada
Servicios públicos de bomberos	100/1000
Rociadores	20/1000
Sistemas de alarma combinados con bomberos entrenados y emplazados “in situ”	≥ 10/1000 : 1/1000
Tanto rociadores como bomberos emplazados “in situ”	≥ 1/10.000

Tabla 3

1.3 Objetivos de la seguridad frente a los incendios

La seguridad frente a los incendios debe preocuparse, fundamentalmente, de alcanzar dos objetivos:

1. reducir la pérdidas humanas en el interior o los alrededores de edificios en llamas.

2. reducir las perdidas económicas y en propiedades en el interior o alrededores de los edificios afectados.

En la mayoría de los países la responsabilidad de alcanzar estos objetivos se haya repartida entre las autoridades civiles, quienes tienen que fijar en sus leyes los niveles de seguridad para proteger las vidas humanas, y las compañías de aseguradores que incentivará la reducción de perdidas a través de sus primas.

Muchas veces estos objetivos pueden parecer incompatibles, o incluso beligerantes. Por ejemplo, los rociadores y los aparatos de detección automática son contemplados más como protectores de las propiedades que de las vidas, y las compañías aseguradoras ofrecen substanciales descuentos en las primas cuando son instalados. Sin embargo, no figuran apenas en la mayoría de las normas sobre edificaciones, pero el hecho de su existencia sugiere que son extremadamente efectivos para salvar vidas.

De hecho las medidas necesarias para ahorrar perdidas materiales y humanas son muy similares.

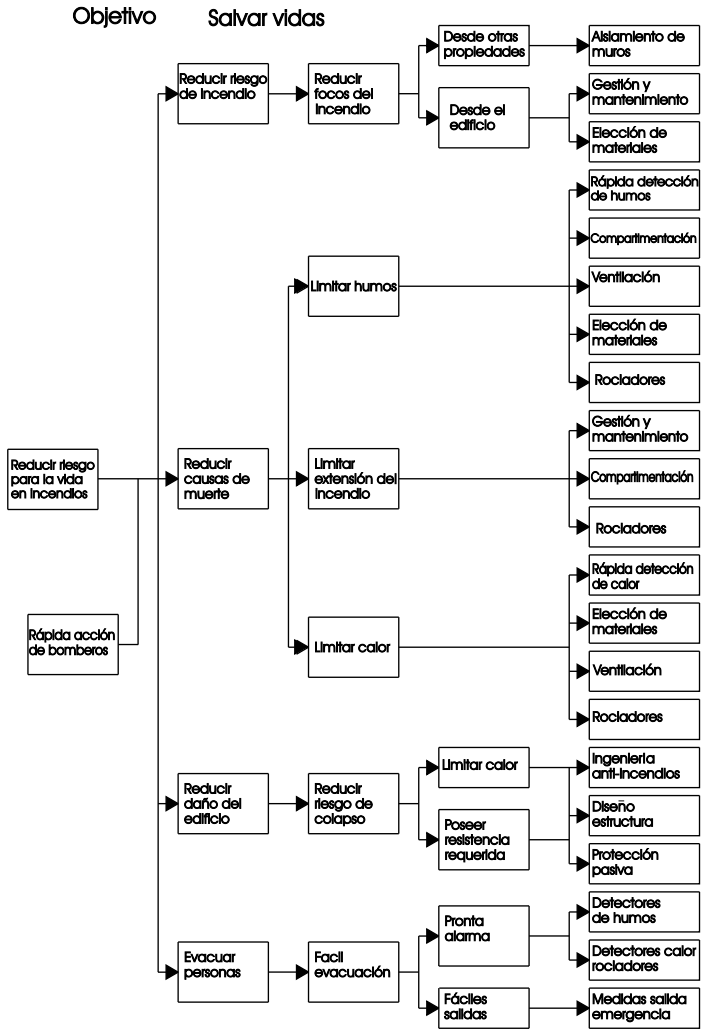


Figura 1a Reducción del riesgo de pérdidas humanas

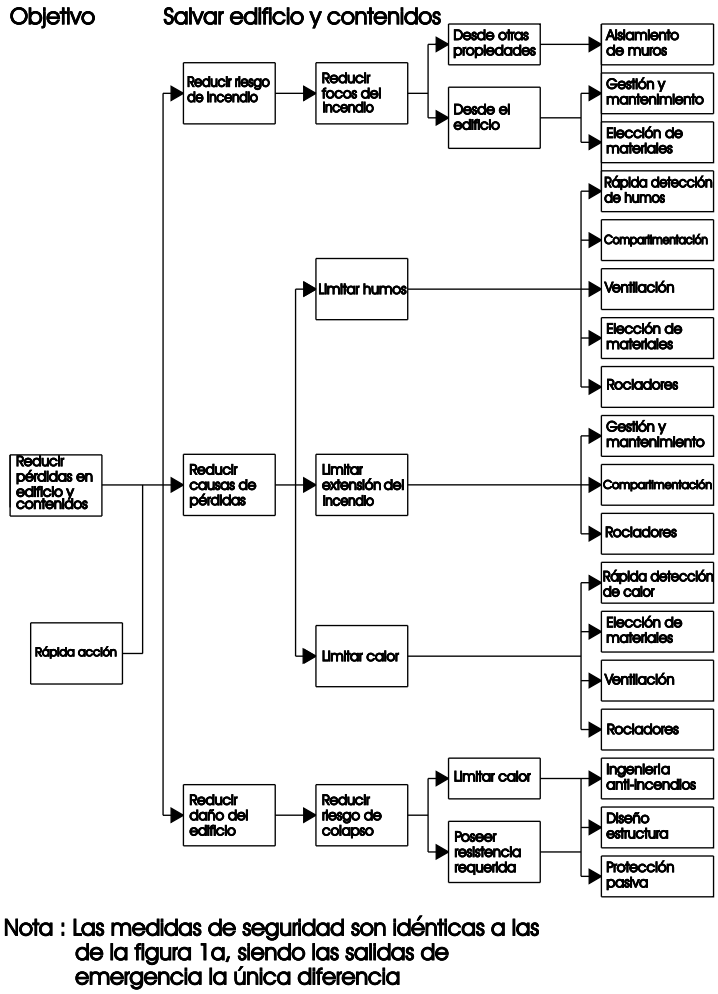


Figura 1b Reducción de riesgos de pérdidas de bienes

Las figuras 1a y 1b muestran un medio sistemático para identificar la mayor parte de las opciones disponibles para reducir perdidas. En ellas puede verse que prácticamente todas las medidas reducen el riesgo de perdidas humanas, así como el de perdidas económicas, directas o indirectas. Lo que realmente se pone de relieve es que la seguridad global frente a un incendio debe ser alcanzada por la implantación y consecución de unos enfoques adecuados de seguridad ante el incendio.

1.4 Distintos enfoques para la seguridad ante un incendio

Estos planteamientos o enfoques se definen como paquetes óptimos de medidas estructurales, técnicas y organizativas que permiten alcanzar objetivos definidos, consensuados por la Propiedad, las autoridades administrativas y el diseñador.

A la hora de desarrollar posibles enfoques de seguridad frente a los incendios, es esencial comprender el desarrollo normal de un incendio incontrolado como el mostrado en la figura 2.

En una figura muy similar, figura 3, se muestran las posibles razones para el éxito o el fracaso de unas medidas preventivas bien definidas.

Analizando esta figura se puede entender que existen tres planteamientos básicos que permiten controlar el riesgo de un incendio, a saber:

- un planteamiento puramente estructural que admite la superación del punto de “flash-over” dentro de un número limitado de habitáculos.
- un enfoque basado en un sistema de alarmas que evite la superación del “flash-over”.
- un tercero que pretenderá evitar la propagación mediante sistemas de extinción.

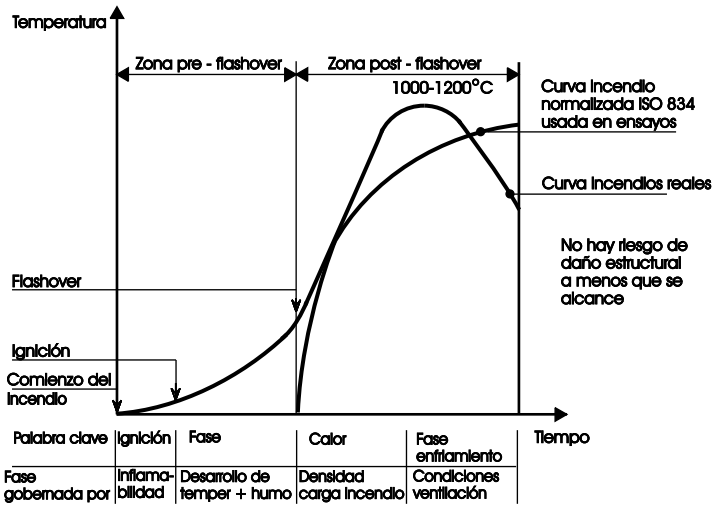


Figura 2 Desarrollo del incendio incontrolado

1.4.1 Enfoque estructural para la seguridad en un incendio

Éste consistirá en una combinación de una adecuada compartimentación y una estructura resistente a las altas temperaturas; ésta puede ser la mejor opción en el caso en el que el uso normal del edificio permita la instalación de suelos y paredes resistentes al calor.

En este caso se admitirá que el incendio podrá alcanzar el "flash-over" o punto de propagación antes de que comiencen las acciones para su extinción.

El tiempo de resistencia al incendio debe fijarse con el objetivo de que el fuego no se extienda fuera del habitáculo establecido. Consecuentemente, la capacidad de los elementos resistentes para soportar carga (eventualmente) y su aislamiento deben mantenerse durante la duración estimada del incendio.

Los componentes combustibles de los edificios deberán ser diseñados o protegidos de manera que se prevenga el peligro de propagación. Un ejemplo es el de tejados con dos capas, donde la capa no combustible debe cubrir a la combustible. El diseño de fachadas deberá evitar que las llamas asciendan al piso superior.

Es importante resaltar que todos los elementos usados en la división o compartimentación, como los muros o paredes, techos y eventualmente los tejados deben cumplir 3 criterios para poder ser clasificados dentro de una clase de resistencia al incendio (30/60/90...).

- un criterio de resistencia de carga que asegure la estabilidad del elemento.
- un criterio de aislamiento que demuestre su capacidad aislante.
- un criterio de impenetrabilidad, que se asegurará de que las llamas y los humos no pueden atravesarlo.

Aquellos elementos estructurales con una función resistente, pero que no forman parte de los sistemas de separación, sólo han de cumplir el primer criterio.

La resistencia al incendio de los componentes de un edificio suele fijarse en las normas apropiadas, y se expresa normalmente en unidades de tiempo.

El período de tiempo de resistencia ante un incendio suele expresarse en múltiplos de 30 minutos, por ejemplo 30, 60, 90 minutos, y siempre en relación al incendio normalizado descrito en la norma ISO. Esto significa que un componente capaz de cumplir su función durante el tiempo prescrito cuando es sometido aun régimen de temperaturas como el descrito en la norma ISO.

Algunos bloques de oficinas que se han construido recientemente son excelentes ejemplos de este concepto.

La variación temporal de la temperatura en un incendio normalizado puede diferir bastante de la que se presenta en uno real, pero las normas modernas de diseño permiten determinar la resistencia para incendios reales, tal y como se describe en el párrafo 1.5. El criterio de tiempo no debe ser confundido con el tiempo de evacuación de los ocupantes o de intervención del cuerpo de bomberos.

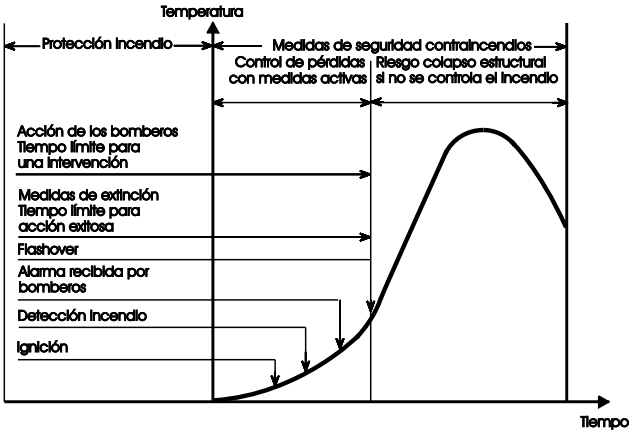


Figura 3 Medidas prevención contraincendios y condiciones de control

Desde el punto de vista de la estructura y sus ocupantes suele ser más efectivo el

uso de otros enfoques alternativos, que eviten que el punto de "flash-over" sea sobrepasado mediante el uso de medidas de protección activas. Las medidas de detección y alarma o en sistemas de extinción.

1.4.2 Enfoque de vigilancia

Estos enfoques están basados en instrumentos automáticos de detección y transmisión de señales de alarma a un equipo de bomberos (con servicio 24 horas al día), preferentemente con base en el propio edificio.

Un sistema de este tipo (figura 4) que lleve asociada una resistencia estructural frente a un incendio limitada o incluso inexistente puede representar la mejor solución cuando el uso habitual del edificio desaconseja la compartimentación del espacio.

También se usa con más frecuencia para usos con densidades de cargas de combustibles muy reducidas, para edificios entre bajos y medios en los que es previsible que el incendio se desarrolle lentamente y allí donde se disponga de un equipo de bomberos efectivo y de intervención rápida.

- Detección del incendio

  Los sistemas automáticos son activados por tres medios: humo, calor o llamas. Funcionan mecánica, eléctrica y electrónicamente. Es preferible el uso de los detectores de humos, por ser éstos considerablemente más efectivos que los otros. Cuando los detectores comienzan a funcionar, la alarma se dispara automáticamente. Para que la efectividad sea máxima, la alarma debe ser transmitida de día o de noche a la estación de bomberos más cercana. Los sistemas de alarma con sirenas sonoras son prácticamente los únicos efectivos contra incendios provocados.

  Los rociadores funcionan como elementos de extinción, pero también como sistemas de alarma "lentos" (al detectar sólo el aumento de calor).

- Extinción

  La efectividad en la extinción de un incendio depende en gran medida del tiempo empleado por los bomberos en llegar al edificio y acceder al incendio.

  El medio más fácil para la extinción es el uso de extintores manuales, en el caso en el que haya personas que detecten el incendio y que sean lo suficientemente hábiles para usarlos con eficacia.

  Los equipos de extinción pueden ser bien bomberos públicos, o bien equipos privados con base en el propio edificio. Estos últimos tienen la ventaja de estar familiarizados con el local y tener que recorrer distancias menores para alcanzar el foco, pero en todos los casos es necesario dotar al edificio de rutas de acceso adecuadas para los vehículos. Tanto para los bomberos, como para los rociadores es necesario un suministro de agua adecuado, con una protección que esté preparada para bajas temperaturas. En un habitáculo el radio de acción efectivo para un bombero es de hasta 20 m..

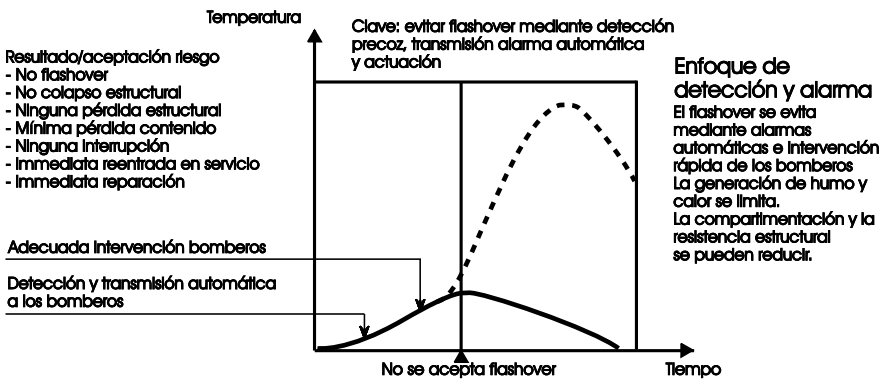


Figura 4 Enfoque contraincendios de alarma.

1.4.3 Enfoque de extinción

Están basados en sistemas de extinción automáticos como rociadores, CO_2 o Halón, con transmisión automática de alarma a un equipo de bomberos y a los propietarios. En la figura 5 se ilustra su funcionamiento.

Los propietarios suelen tener miedo del posible daño causado por estos sistemas en el material o la maquinaria existente en el edificio. Pero es preciso saber que los rociadores únicamente abren sus válvulas en los lugares donde la temperatura alcanza el valor límite, entre los 70° y los 140°C y, además el 75% de los fuegos que se producen en instalaciones con rociadores llegan a controlarse con un máximo de 1 a 4 bocas rociadoras. Esto representa que tan sólo se mojarían los contenidos en un área de 50 m^2. Estos sistemas automáticos de alarma informan al propietario y a los bomberos al mismo tiempo. El mantenimiento de estos sistemas de detección y extinción se debe hacer anual e incluso semestralmente por personas especializadas.

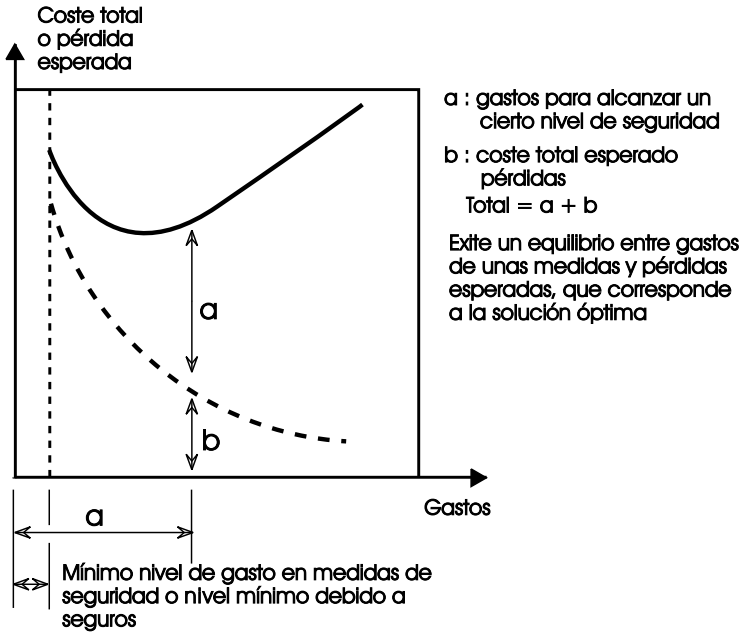


Figura 6 Relación entre los gastos en medidas preventivas y pérdidas esperadas (esquemática)

Estos enfoques alternativos de alarma y extinción están obteniendo mayor y mayor aceptación en muchos países. El prospecto “Steel and Fire Safety: a global approach”, editado por el comité de promoción del acero del EUROFER, incluye una investigación sobre la extensión que los sistemas de protección del acero reducidos, e incluso inexistentes, están consiguiendo a nivel internacional.

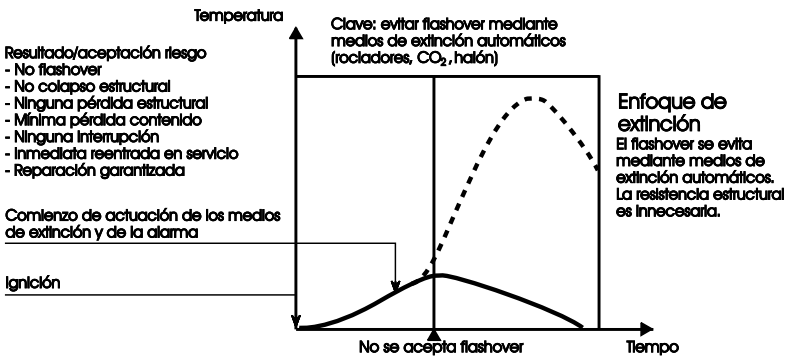


Figura 5 Enfoque contraincendios de extinción

1.5 Efectividad económica

Los tipos de uso y de diseño estructural son las dos variables fundamentales que gobiernan la cantidad de medidas de protección antiincendios necesarias, y por lo tanto el coste total del modelo de seguridad contra el incendio. Las consideraciones a tener en cuenta durante el diseño de la estructura antes cargas de servicio y las que han de tenerse en cuenta ante el incendio deben integrarse desde el comienzo del diseño, de tal manera que se obtenga un nivel de seguridad óptimo con una mínima inversión. Este objetivo sólo puede alcanzarse mediante una adecuada comunicación entre los diseñadores de los edificios y las autoridades encargadas de la protección de incendios, desde el comienzo de la planificación de los edificios.

Un análisis de la relación entre los costes y los beneficios indica que con similares inversiones los beneficios pueden variar grandemente.

La figura 6 muestra que, cuando el nivel de gastos, y por lo tanto, el de seguridad se aumentan, las pérdidas esperadas originadas por un incendio disminuyen. Esta relación se ha representado esquemáticamente por la línea de trazos. La curva de pérdidas frente a inversiones presenta una forma hiperbólica lo que significa que pasado un cierto punto, se obtiene un beneficio muy pequeño al incrementar el nivel de protección.

De esta relación entre gastos y perdidas esperadas es posible deducir la proporción entre gastos y costes globales debidos al incendio (perdidas esperadas + gastos)

Obsérvese la curva continua, cuyo mínimo representa la solución.

En este contexto, conviene no olvidar que los gastos no deben ser inferiores a un cierto valor mínimo, relacionado con los costes de los requisitos de seguridad para salvaguardar la vida humana y/o el nivel mínimo aceptable desde el punto de vista de los seguros. Este mínimo ha sido representado también en la figura.

Finalmente, otro aspecto que habrá que considerar con atención es el criterio por el cual se va a juzgar el comportamiento de la estructura cuando ésta se encuentre sometida a un incendio. Si se plantea la implementación de cualquier medida con el objetivo de mejorar la seguridad, ha de tenerse en cuenta el efecto de estas últimas. La experiencia en los incendios de gran tamaño demuestra que éstos pueden dañar la estructura hasta un punto que requiera su demolición, incluso aun cuando no haya colapsado. El dinero invertido en protección contra un eventual colapso debería contemplarse, entonces, como una pérdida. En casos como éste podría ser mejor o bien limitar las precauciones hasta un determinado nivel que permita garantizar la evacuación de los ocupantes durante el incendio, o bien, seleccionar un enfoque de seguridad alternativo.

En un análisis detallado de costes y beneficios se requiere un planteamiento diferenciado, que mediante el cálculo de los costes de las medidas de seguridad para distintos enfoques, permita una optimización de los mismos. La fórmula básica es la siguiente:

$$\begin{bmatrix}\text{Coste anual de la seguridad frente al incendio}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{Suma de todas las inversiones en seguridad}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\%\ \text{interés hipotecario}\end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix}\text{Coste mantenimiento anual}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\text{Primas anuales para el enfoque de seguridad seleccionado}\end{bmatrix}$$

En la mayoría de los casos, enfoques alternativos se muestran más efectivos que el que persigue la integridad estructural.

Para los arquitectos y los ingenieros, la cuestión crucial consiste en el establecimiento del nivel de los requerimientos que han de cumplir, que englobe, tanto el enfoque global de seguridad ante el incendio, como una optimización de la eficiencia económica de los distintos enfoques de seguridad modernos.

2. REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL DURANTE UN INCENDIO DE LOS ELEMENTOS CARGADOS

La resistencia durante un incendio está gobernada por dos modelos:

- un MODELO DE TRANSMISIÓN DEL CALOR
- un MODELO ESTRUCTURAL

los cuales tienen 3 ó 4 niveles de sofisticación.

Los métodos tradicionales de cálculo se basan en la curva normalizada del incendio, desde el punto de vista del modelo de transmisión del calor, pero existen métodos cuantitativos que se sustentan en incendios reales.

La tabla 4 permite visualizar los tres métodos existentes para el cálculo, donde

$F_{elemento}$ es la resistencia al incendio medida en minutos para el elemento elegido.

$F_{requerida}$ es la resistencia requerida.

LOS MÉTODOS DE CÁLCULO 1 Y 2 SON SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

F-requerida y F-elemento se agrupan en categorías mediante tablas o mediante cálculo, en clases o categorías de resistencia, empezando con 15 y 30 minutos, y continuando en saltos de 30/60/90.... minutos.

LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN 3 (a + b) SON SISTEMAS DE CÁLCULO que usan en sus operaciones las características de fuegos reales, y donde se ha de comprobar la estabilidad de la estructura.

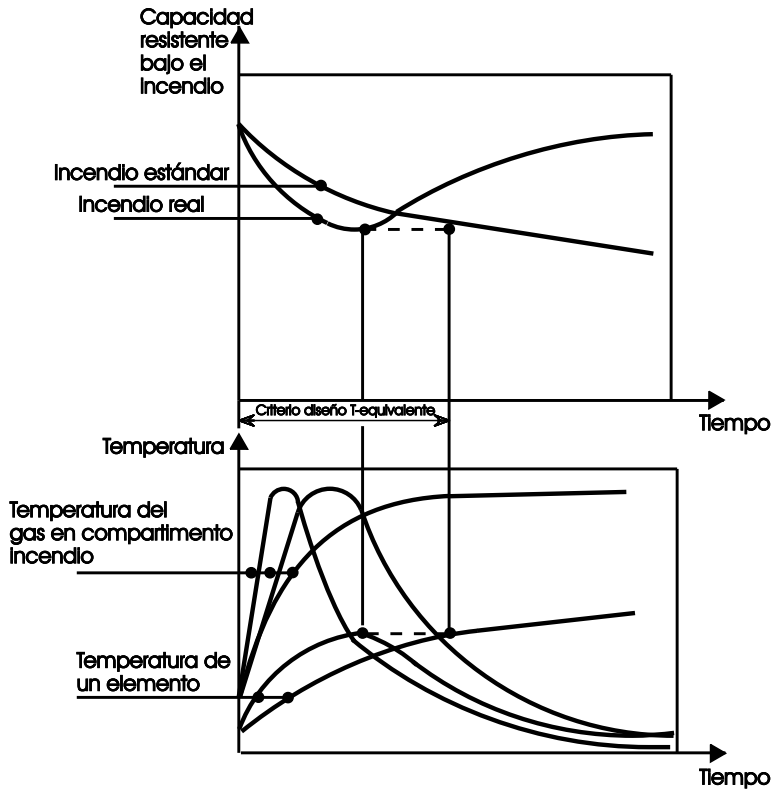


Figura 7 Concepto de temperatura equivalente

Cada uno de estos métodos es presentado en mayor detalle seguidamente, junto con una descripción de las ventajas que pueden presentar mejores aproximaciones a la realidad.

2.1 Requerimientos de resistencia frente al incendio actuales: Método de Evaluación 1

La expresión “requerimientos de resistencia actuales” quiere representar los valores de resistencia fijados por las distintas normativas nacionales. Todas ellas usan clases de resistencia al incendio (15/30/60/90 minutos) que representan el tiempo que puede resistir un elemento la acción de un incendio normalizado, tal como el descrito por la curva de exposición al calor de la norma ISO834 (UNE 23-093-81 en

España). El nivel de exigencia es una función del número de plantas y, dependiendo del país, puede variar con el uso del edificio y la carga de combustible del contenido del mismo.

2.2 Requerimientos de resistencia basados en la T- equivalente = Método de Evaluación 2

El concepto de duración efectiva o equivalente de un incendio supone un primer, pero importante, paso hacia un planteamiento más diferenciado o específico. La duración equivalente es una cantidad que relaciona un incendio no normalizado o real con el estándar, en el modo que se ha representado en la figura 7, y que puede calcularse conocida la densidad de la carga de combustible y las condiciones de ventilación del compartimento considerado.

En aproximaciones más refinadas de este método, se puede considerar la influencia de las propiedades térmicas de los componentes del edificio que rodean al compartimento bajo la acción del incendio.

Para cada uso de un determinado edificio, y para cada tipo de compartimento, el concepto de T-equivalente ofrece una aproximación razonable a un incendio real.

La resistencia requerida F-requerida = γ. T-equivalente, siendo γ un factor de seguridad. Normalmente este coeficiente se considera unitario, siempre que se considere el 100% de la carga de combustible.

En la actualidad la F-requerida se fija como la correspondiente a la clase inmediatamente superior, con un intervalo de 15 ó 30 minutos.

Este método está pensado para conseguir que elementos calculados para un γ. T-equivalente resista la acción de un incendio real sin colapsar, incluso en el caso de que no se produzca la intervención de brigadas de bomberos.

Esta es la principal característica del concepto de T-equivalente.

Una ventaja importante de esta idea es que la cantidad tremenda de datos e información acumulados durante la realización de ensayos de incendios, puede ser usada para verificar los resultados de cualquier cálculo.

Muchos países han adoptado oficialmente este método de una manera más o menos sofisticada.

La guía de cálculo para la seguridad estructural durante incendios preparada durante la reunión W14 del CIB (Conseil Internacionel du Bâtiment) [7], ofrecela siguiente formula para la T-equivalente.

$$T_e = c \cdot w \cdot q_f$$

donde q_f es la densidad de carga de combustible en relación con el área del compartimento del incendio. El apéndice 1 de la guía de diseño suministra un vistazo muy detallado de la evaluación, cálculo individualizado y valores estadísticos de las cargas de combustible.

Las siguientes tablas presentan un abanico de valores medios para una densidad de carga de combustible variable en MJ/m^2 de varios usos conocidos (factor de combustión igual a 1):

viviendas	330 : 780 MJ/m^2	
hospitales	100 : 330 MJ/m^2	
hoteles	310 : 330 MJ/m^2	
oficinas	80 : 550 MJ/m^2	(excluyendo archivos, almacenes, biblioteca y habitaciones especiales)
colegios	215 : 340 MJ/m^2	(excluyendo pasillos y almacenes)
c. comerciales	400 : 900 MJ/m^2	(excluyendo EE.UU.)
aparcamientos	200 : 300 MJ/m^2	

El valor fijo de la densidad de combustible (fijo par un determinado edificio) para estos usos varía entre 50 MJ/m^2 (aparcamiento) y 450 MJ/m^2 (sala de profesores en un colegio).

Globalmente, los valores de densidades de carga combustible pueden agruparse en las siguientes categorías:

BAJA menos de 250 MJ/m^2 (no es posible el flashover): aparcamientos

MEDIA 500 a 1000 MJ/m^2: viviendas, hospitales, hogares, oficinas, escuelas, etc.

ALTA 1000 a 2000 MJ/m^2: fabricación y almacenaje materiales combustibles <150 kg/m^2

MUY ALTA más de 2000 MJ/m2: almacenes, depósitos.

donde c es un factor de conversión que refleja el efecto de la inercia del compartimento

donde W es un factor de ventilación para todas las aperturas (ventanas, puertas, aberturas, claraboyas) que permitan la evacuación del calor y la entrada de aire fresco al compartimento.

Básicamente el valor de $F_{requerida}$ debe ser:

$$F_{requerida} = \gamma = t_e$$

donde γ es un factor de seguridad parcial para cubrir los imponderables del modelo. Para casos normales, γ se toma igual a uno, debido a que parte de la carga de combustible se incendia fuera del compartimento y que la combustión nunca es total.

Casos normales $F_{requerida} = t_e$. Para t_e calculada con la hipótesis de que el 100% del contenido del compartimento se quema dentro de él.

Internacionalmente, el método de temperatura equivalente fue introducido por la reunión W14 del CIB [7]. Las medidas activas de protección se han de tener en cuenta.

2.3 Métodos de cálculo basados en incendios reales = Método de Evaluación 3

2.3.1 Introducción

Estos métodos que se van a presentar a continuación son los últimos y más sofisticados medios para definir el correcto nivel de resistencia estructural frente a un incendio.

La disponibilidad de métodos de cálculo basados en el ordenador ha permitido la consideración de cualquier modelo para la transmisión del calor.

En cualquier caso, el grado de aproximación del incendio a la realidad puede variar en función del modelo seleccionado. Los siguientes modelos son los más empleados:

- el modelo de compartimento del incendio se supone constante después de haberse producido el “flashover”.
- modelos con distribución no uniforme de la temperatura en el compartimento incendiado (modelos zonificados o de campo)

Todos estos métodos de cálculo se basan en el empleo al unísono de modelos estructurales y de transmisión de calor más refinados. La verificación consiste en verificar la estabilidad de la estructura durante la acción de un incendio real, para las cargas presentes en el momento del incendio.

Otra ventaja de estos métodos, que conviene ser tenida en cuenta, es la posibilidad de emplearse, con ligeras modificaciones, para verificar la resistencia de la estructura durante un período limitado de tiempo, suficiente para asegurar la evacuación.

El interés de estos métodos de cálculo se verá reforzado por la nueva generación de Eurocódigos [8, 9], las cuales consideran el incendio como una situación accidental.

2.3.2 Incendios compartimentados = Métodos de Evaluación 3a

Este método puede aplicarse en casos donde los habitáculos independientes son de un tamaño como el que es habitual en hoteles, colegios y viviendas, etc. y una distribución uniforme de la carga de combustible. Para estos casos la simplificación de considerar la distribución de temperatura en el habitáculo uniforme es correcta. Este método precisa el establecimiento del valor del siguiente conjunto de variables:

- La cantidad de material combustible uniformemente distribuido en el habitáculo = densidad de carga de combustible (fija y móvil);
- La velocidad de combustión de los distintos materiales;
- La geometría del compartimento;
- La ventilación del mismo;
- El comportamiento térmico de los muros y suelos que forman el habitáculo.

Algunas de variables pueden ser aproximadas o incluso ignoradas. Las dos variables más influyentes son:

- La densidad de carga de combustible.
- La ventilación del compartimento.

Esta influencia de estos dos factores ha sido ilustrada en las figuras 8a y 8b. Corresponden a modelos simplificados de incendios compartimentados. Las actuales teorías que soportan estos métodos desprecian el período anterior al "flashorver", por lo que la respuesta de la estructura está principalmente gobernada por la evolución de la temperatura una vez superado dicho punto.

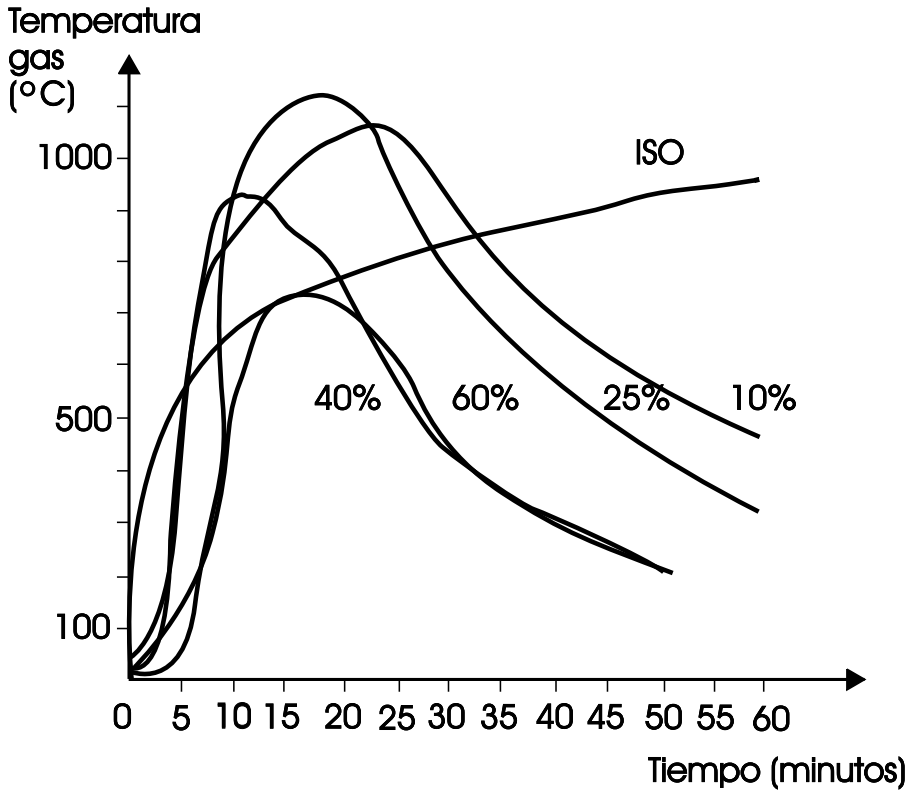


Figura 8a Evaluación de la temperatura del gas en función de la ventilación (porcentaje de área abierta sobre área total)

2.3.3 Modelado del incendio = Método de Evaluación 3b

Estos métodos tratan de evaluar la evolución del incendio como un problema no uniforme, la cual, para un espacio determinado y para una temperatura de la carga de combustible, estará gobernada por:

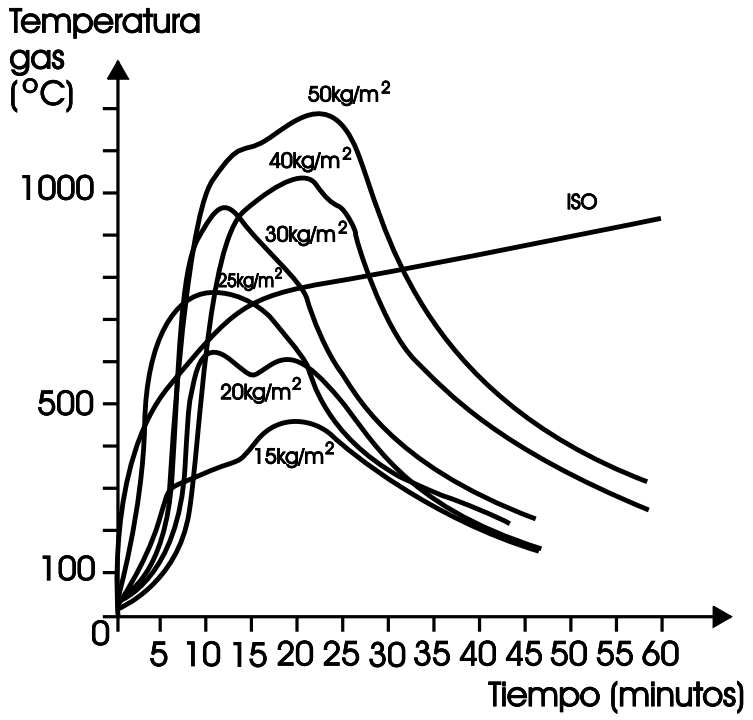


Figura 8b Influencia de la densidad de carga de fuego en la temperatura del gas (factor ventilación fv = 0.091$m^{-1/2}$)

- La localización de foco inicial del incendio
- El crecimiento de dicho foco inicial
- El tamaño, geometría, ventilación e inercia térmica del compartimento.

Por lo tanto, el desarrollo de la temperatura será función de:

- Tiempo, y
- La localización de un determinado elemento estructural en el habitáculo.

Estos modelos deben ser calibrados. Se han llevado a cabo ensayos internacionales en grandes espacios (CTICM Francia..) o en laboratorios con grandes instalaciones (Finlandia/Espoo) lo que ha permitido medir la variación de la temperatura de los incendios reales en diferentes puntos . Estos métodos son útiles para los casos de incendios localizados en grandes espacios o grandes habitáculos.

2.4 Algunas reflexiones sobre los requerimientos de resistencia durante un incendio cuando se usan medidas de protección activas

Si es posible evitar la ocurrencia del "flashover" mediante el uso de medidas de protección activas (sistemas de alarma, equipos de extinción adecuados, rociadores, CO_2, Halón), la estructura nunca se verá en peligro por el incendio.

Consecuentemente, con independencia de cualquier enfoque que se adopte para determinar las condiciones de protección, éstas pueden ser reducidas o eliminadas, siempre que exista una probabilidad elevada de éxito de las medidas de protección activa instaladas.

De hecho un número cada vez mayor de países como Suecia, Suiza y Alemania permiten reducir o hasta eliminar los requisitos de resistencia cuando la probabilidad de que no se produzca el "flashover" o de que el foco del incendio esté muy localizado es suficientemente alta. Algunos otros países también están siguiendo esta tendencia. Estos enfoques alternativos se limitarán a ocupaciones en las que no se esperan cambios significativos en su uso y en edificios con un número limitado de edificios. El principal argumento en contra de estos enfoques alternativos es la fiabilidad de las medidas activas, en el sentido de que, si fallan en su objetivo de suprimir el foco inicial, entonces una estructura con una capacidad de resistencia reducida puede representar un considerable peligro. En cada caso se deben considerar los riesgos de colapso.

El enfoque de modelado del incendio es un modo apropiado de demostrar la efectividad de los enfoques alternativos. De hecho, la dependencia entre los requerimientos estructu-

rales y riesgos potenciales se acepta universalmente, pero la dependencia de medidas no estructurales (que gobiernan la frecuencia de incendios graves) no alcanza la misma aceptación como parámetro de diseño. La modelización del fuego permitirá, en último caso, cuantificar e incorporar en el cálculo la influencia de medidas activas de seguridad.

Para el método de evaluación 2 (T-equivalente), la guía de diseño del CIB propone multiplicar el valor de la t_e calculada tal como se describe en el punto 2.2 por un factor diferencial que cuantifique la existencia de medidas de prevención. Este factor variará en función del nivel de seguridad, efectividad y fiabilidad de las medidas de protección implementadas, y en cualquier caso es menor que la unidad.

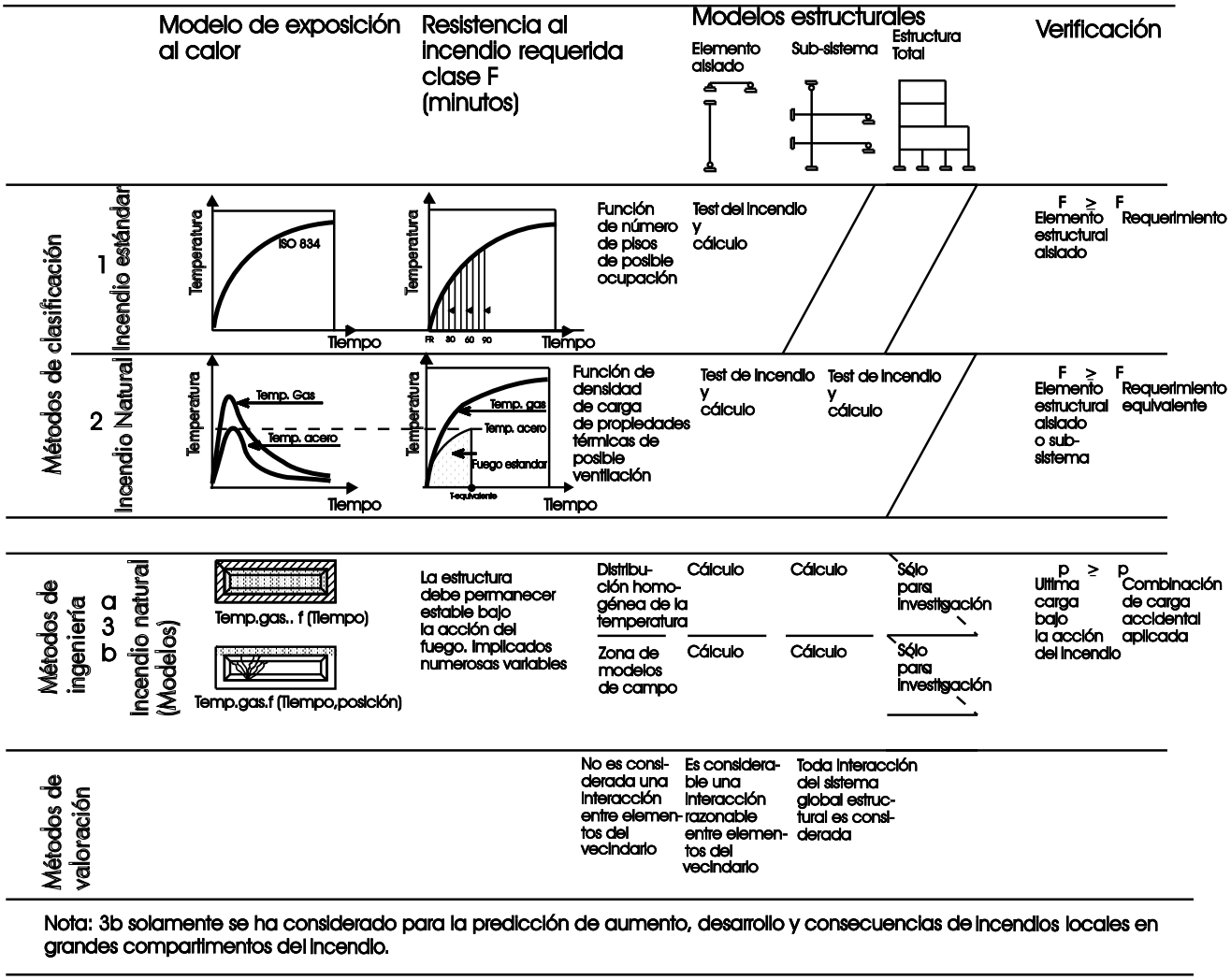


Figura 9 Resumen sobre métodos de valoración

3. RESUMEN FINAL

Los objetivos de la seguridad ante el incendio consisten en reducir la pérdida de vidas y propiedades o pérdidas económicas, durante incendios en edificios o vecindarios.

Los conceptos de seguridad ante el incendio que se utilizan para este propósito son grupos de medidas de prevención estructurales, técnicas y de organización, tomadas por el propietario, el jefe de bomberos y el arquitecto.

Hay diferentes conceptos de seguridad disponibles, incluyendo conceptos estructurales, de control y extinción.

La definición que dan arquitectos e ingenieros del nivel de requisitos de resistencia al fuego se basa en un acercamiento a la seguridad global ante el fuego y a un menor coste-efectividad de los modernos conceptos de seguridad.

Son varios los métodos de valoración utilizados, incluyendo sistemas de clasificación y métodos de ingeniería.

4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Kletz T.A., Symposium on Loss Prevention in Chemical Industry - Inst. Chem. Eng., Newcastle on Tyne, 1971.

[2] Sowby F.D., Symposium on Transporting Radioactive Materials, April 1964.

[3] Fry J.F., Inst. Fire Eng. Edinburgh (1970) 30 77.

[4] Field Survey on the Role of Steel Structures in Industrial Fires. Evaluation of European Research carried out in France and in the Netherlands. ECSC-Agreement Number: 7219-SA-307 & 607.

[5] Baldwin R. and Thomas P.H., Passive and active fire protection - the optimum combination. Fire Research Station. Fire Research Note Number 963, London, 1973.

[6] DIN 18 230: Baulicher Brendschutz im Industriebau. Teil I: Technerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Deutches Institut für Normung e.V., Berlin.

[7] CIB (Conseil International du Batiment) W14 Workshop “Structural Fire Safety”: A Conceptional Approach Towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire Safety. Fire Safety, Volume 6, Number 1, 1983. Elsevier Sequoia S.A., Lausanne.

[8] Eurocode 1: “Basis of Design and Actions on Structures”: Part 2.7: Actions on Structures Exposed to Fire, CEN (in preparation).

[9] Eurocodes 2-6: “Design of Concrete, Steel, Composite, Timber and Masonry Structures”: Parts 10: Structural Fire Design, CEN (in preparation).

5. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

1. European Convention for Constructional Steelwork, “Design Manual on European Recommendations for Fire Safety of Steel Structures”, ECCS Publication 35, Brussels, ECCS, 1985.

2. Robinson, J., “Fire Protection and Fire Engineering”, Chapter 34 - Steel Designers’ Manual 5th ed, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1992.

3. Fire Protection for Structural Steel in Buildings, SCI P-013, 2nd Revised Ed, Association of Fire Protection Contractors and Manufacturers, ASFPCM, Aldershot, 1992.

5. Handbook of Fire Protection Engineering, 1st Ed, National Fire Protection Association, NFPA, USA, 1988.

6. Steel and Fire Safety - A Global Approach, Eurofer Steel Promotion Committee Brochure, Eurofer, Brussels, 1990.

ESDEP TOMO 6
PROTECCIÓN: INCENDIO

Lección 6.2: Principios de Análisis Termodinámico

OBJETIVOS/CONTENIDO

Se introducen los principios básicos para el análisis térmico en las situaciones de incendio.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Conocimientos básicos de Termodinámica.

LECCIONES AFINES

Lección 6.1:	Introducción a la Seguridad ante el Incendio
Lección 6.3:	Principios de Análisis Estructural
Lección 6.4:	Métodos Prácticos de Lograr la Resistencia contra el Incendio
Lección 6.5:	Ejemplos de Cálculo

RESUMEN

Se presentan los modelos térmicos y las reglas simples para el cálculo de la respuesta térmica transitoria de elementos de acero, bien protegido o sin proteger. Se introducirá el concepto “factor de la sección” para los perfiles laminado de acero. Se estudiarán, asimismo, los elementos (columnas y forjados) mixtos.

1. INTRODUCCIÓN

Un incendio es un fenómeno complejo que puede tomas muchas formas y durante su desarrollo pueden presentarse deferentes reacciones químicas.

Desde un punto de vista estructural, sólo presentan interés aquellos incendios que pueden provocar daños a la estructura, y en este caso, el incendio debe ser contemplado como una situación accidental.

Los criterios de diseño para la seguridad durante los incendios requieren la elección de modelos estructurales y térmicos

El incendio se suele representar por una curva temperatura-tiempo, que representa la temperatura media alcanzada durante un incendio en un compartimento pequeño o en un horno de los usados para ensayos de incendios. Las normas internacionales se basan en un incendio normalizado definido por una exposición térmica dada por la curva ISO-834 (figura 1). En algunos casos se puede usar los incendios reales cuyas relaciones temperatura-tiempo son diferentes en función de la densidad de combustible o de las condiciones de ventilación de cada caso (figuras 2a y 2b).

En análisis más complejos se pueden usar diferentes modelos para representar el

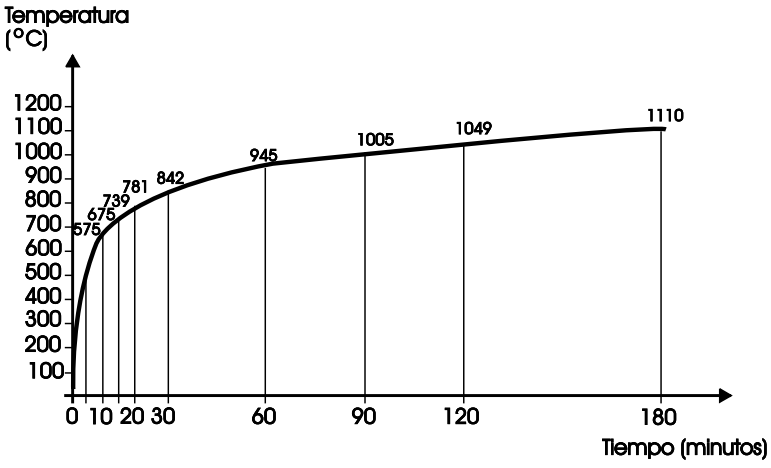


Figura 1 Curva normalizada ISO de incendio

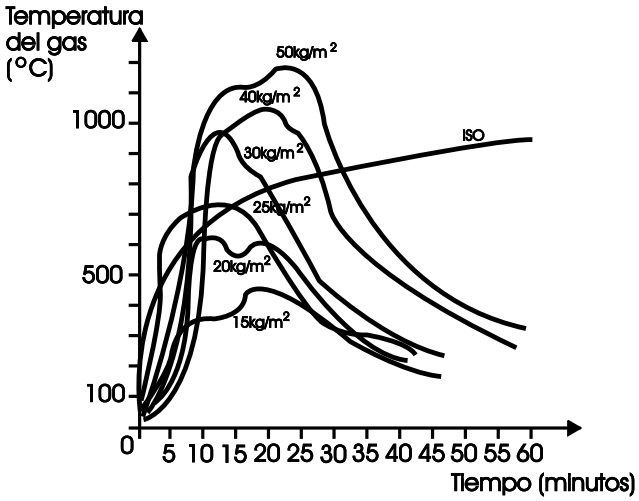


Figura 2a Evolución de la temperatura del gas para diferentes densidades de carga de combustible (Factor de ventilación f_v = 0,091 $m^{1/2}$)

desarrollo de la temperatura en diferentes zonas de un compartimento o en la vecindad de él. Este es el caso, por ejemplo, de edificios industriales muy grandes o para columnas externas a las ventanas de un edificio.

La respuesta de un elemento estructural expuesto a un incendio está gobernada por el flujo de calor recibido, puesto que las propiedades mecánicas de los materiales disminuyen al aumentar la temperatura y, como consecuencia, la resistencia estructural se reduce.

El colapso de la estructura se produce en el momento en el que la resistencia estructural se reduce hasta el valor de las acciones. El período de resistencia puede ser pequeño, si la temperatura crece de manera rápida. Los elementos de acero presentan un comportamiento muy desfavorable en este aspecto, debido a la alta conductividad térmica del material. El calentamiento de todo el perfil se produce de una manera rápida. Como contraste, los elementos mixtos tienen un compartimiento más favorable debido a la gran inercia térmica de los elementos y a la baja conductividad térmica del hormigón.

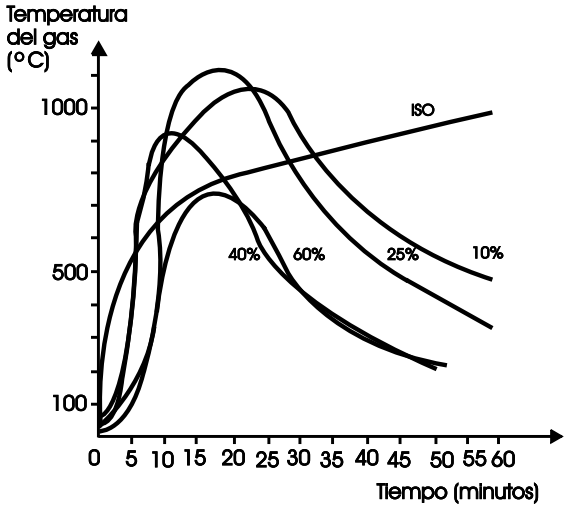


Figura 2b Evolución de la temperatura del gas en función de la ventilación (porcentaje del área abierta frente al área total de la fachada) para un incendio con una carga q = 30 kg/m^2 de superficie de madera

En esta lección se tratarán los aspectos básicos del análisis térmicos. Se comenzará con la ecuación general para la transferencia de calor, para simplificarla posteriormente en el caso de elementos de acero. Se despreciarán los gradientes térmicos a través de la sección y a lo largo del elemento.

Durante un incendio, la temperatura del acero se incrementa similarmente, aunque con un cierto retraso, a la temperatura del gas del fuego (figura 3). El retraso depende de la inercia térmica del elemento, así como de la intensidad del flujo de calor a través de su superficie externa. Si el elemento ha sido revestido con un aislante, este retraso es mayor. Para elementos desnudos éste depende del factor de la sección del elemento.

En la figura 3, se compara la evolución de la temperatura en un elemento para tres casos diferentes. La curva (a) representa el retardo en el calentamiento del elemento sin ninguna protección, las curvas (b) y (c) se corresponden con elementos a los que se ha aplicado una capa de protección, con y sin contenido de humedad.

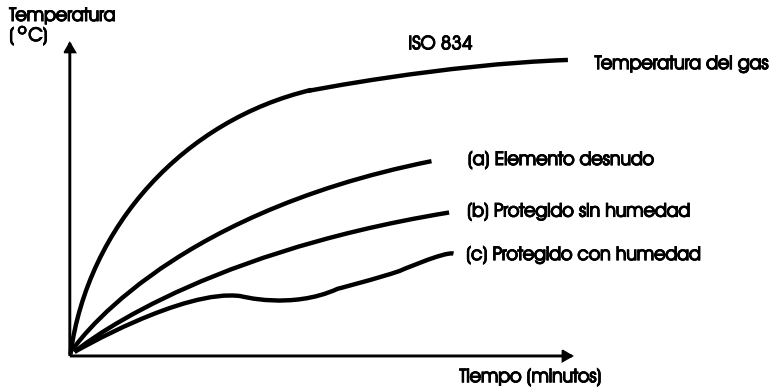


Figura 3 Influencia del aislamiento sobre la velocidad de calentamiento

2. ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El incremento de temperatura de un elemento estructural de acero depende del calor transferido entre el ambiente y dicho elemento.

De acuerdo con la segunda ley de termodinámica, el calor se transmite entre cualesquiera elementos que tienen una diferencia de temperaturas. Los mecanismos por los cuales dicha energía térmica puede transmitirse desde zonas de mayor temperatura a zonas de menor temperatura son la conducción, la radiación y la convección.

En la superficie exterior de un elemento de un edificio se encuentran presentes los tres mecanismos. En el interior de los elementos, el calor se transfiere de un punto a otro por conducción.

El enfoque más general para estudiar el incremento de temperatura en un elemento estructural envuelto en un incendio está basado en la integración de la ecuación de Fourier de transmisión de calor dentro de un elemento. La integración de dicha ecuación permite obtener el balance de energía entre el flujo neto de calor que fluye a través de las paredes, el flujo de calor en el interior del cuerpo por unidad de volumen y de tiempo y la velocidad de cambio de la energía interna. El cambio en la energía interna causa el incremento en la temperatura.

Esta ecuación puede ser resuelta cuando se conocen las condiciones iniciales y de contorno.

Para un incendio, las condiciones iniciales consisten en la distribución de temperaturas al comienzo del análisis (generalmente la temperatura de la habitación al comienzo del incendio); las condiciones de contorno han de ser definidas para cada superficie de la estructura.

Usualmente, las simulaciones de incendios se basan en una evolución de la temperatura con el tiempo, como por ejemplo la de la curva ISO-834 TC 92. Sin embargo, se puede usar cualquier otra relación entre temperatura y tiempo.

Los métodos de cálculo numéricos son necesarios para poder resolver la ecuación de flujo de calor. Existe una gran disponibilidad de programas de ordenador, y es posible realizar análisis térmicos de estructuras muy complejas.

En muchos casos, la forma general de la ecuación puede ser simplificarse bastante. En algunos casos, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico pueden suponerse independientes de la temperatura; la generación interna de calor no existe o puede ser despreciada; y problemas tridimensionales pueden ser idealizados en dos dimensiones e incluso en una.

3. CALENTAMIENTO DE SECCIONES DE ACERO

Al no existir generación de calor en el interior de los elementos de acero y puesto que el material es isotrópico, la ecuación de transferencia de calor de Fourier tomo la expresión:

$$\frac{k_s}{\rho_s c_s}\Delta^2\theta = \frac{\partial\theta}{\partial t} \qquad (1)$$

La cantidad $k_s / \rho_s c_s$ se conoce como difusión térmica y varía con la temperatura.

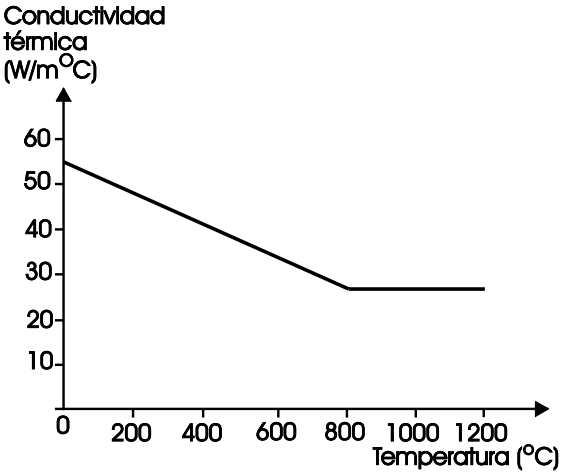


Figura 5 Conductividad térmica del acero en función de la temperatura

La densidad del acero (ρ_s) puede considerarse independiente de la temperatura (ρ_S = 7850 kg/m^3); mientras que la conductividad ks y el calor específico Cs cambian con la temperatura (figuras 4 y 5), pero para cálculos simplificados es posible suponerlas constantes (c_s = 520 J/kg°C y k_s = 45 W/m°C, para todas las calidades de acero).

La solución de la respuesta transitoria se puede obtener por métodos numéricos en su forma más general; pero la conductividad térmica es tan elevada que puede despreciarse la diferencia de temperaturas entre los distintos puntos de una sección transversal.

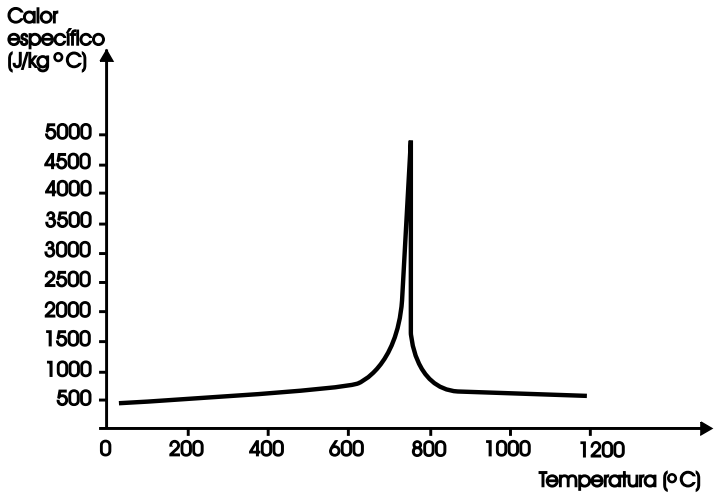


Figura 4 Calor específico del acero en función de la temperatura

Esta simplificación significa que la resistencia térmica a flujo de calor es despreciable. Cualquier calor suministrado a la sección de acero, se supone instantáneamente distribuida para conseguir una temperatura uniforme. De esta manera el balance de energía puede referirse no sólo a un elemento infinitesimal, sino también a toda la sección de material expuesto al calor (figura 6).

La cantidad de calor transferida por unidad de longitud en un intervalo de tiempo Δt es:

$$\Delta Q = K \cdot A_m \cdot (\theta_f - \theta s) \cdot \Delta t \qquad (2)$$

donde:

K es el coeficiente total de transferencia térmica (W/m^2°C)

A_m es el área de la superficie perimetral por unidad de longitud sometido al incendio (m^2/m)

θ_f es la temperatura de gases (°C)

θ_s es la temperatura del acero durante el intervalo de tiempo Δt (°C)

Si esta cantidad es absorbida en su totalidad por la sección, o lo que es lo mismo no se consideran las pérdidas de calor, la energía interna por unidad de lon-

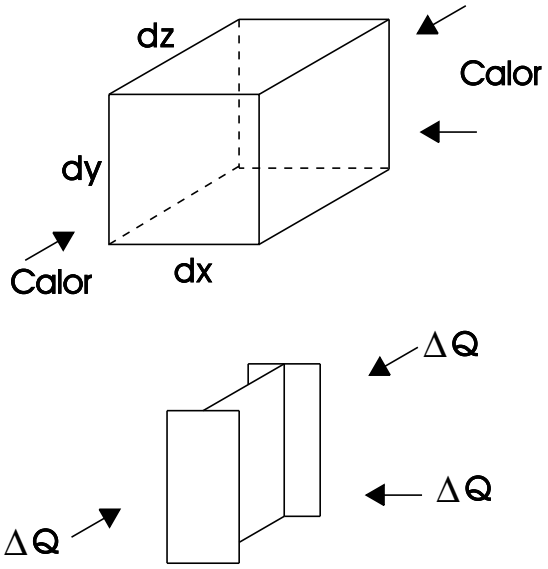


Figura 6

gitud de elemento se incrementa en la misma cantidad:

$$\Delta Q = c_s \cdot \rho_s \cdot A \cdot \Delta \theta_s \qquad (3)$$

donde:

A es el área de la sección transversal del elemento (m^2).

La aumento de la temperatura del acero se obtiene por comparación de (2) y (3) como sigue:

$$\Delta\theta_s = \frac{K}{c_s/\rho_s} \cdot \frac{A_m}{A} \cdot (\theta_f - \theta_s) \cdot \Delta t \qquad (4)$$

Resolviendo esta ecuación incremental paso a paso se obtiene el desarrollo de la temperatura del elemento durante el incendio. Para asegurar la convergencia numérica de la solución, se debe considerar un límite superior par el incremento de Δ t. En el Eurocódigo 3 Parte 1.2 [1] se sugiere que:

$$\Delta t \leq \frac{2,5 \cdot 10^4}{A_m/A}$$

donde:

Δ t se mide en segundos

A_m /A está en m^{-1}

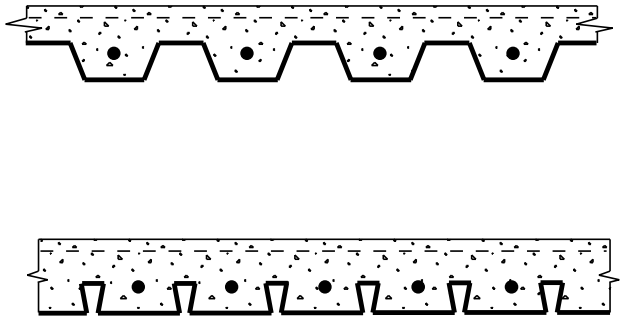


Figura 8 Secciones transversales típicas de diferentes forjados mixtos

Es evidente que un parámetro importante en la determinación del incremento de la temperatura en la sección es el factor A_m /A. Éste es conocido habitualmente como “factor de la sección” (algunas veces definido como F/V, o A/V, o Hp /A en diferentes países).

Cuando el perfil está en contacto con otro elemento, por ejemplo, con un encofrado de hormigón, el cual tiene una conductividad térmica muy inferior a la del acero, el perímetro efectivo expuesto Am debe calculares teniendo en cuenta sólo la parte de la superficie directamente expuesta. Lo anterior exige la asunción de la condición adiabática de la superficie de contacto. El resultado es una solución conservadora: en realidad parte de la energía térmica pasa a través del elemento más frío y, si se desprecia, el incremento de la temperatura en el elemento es más alta.

Es muy importante entender este punto, puesto que es la clave para la decisión de si se puede admitir una solución simplificada para el

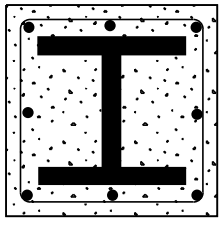


Figura 9 Sección transversal de un pilar con un perfil en H envuelto por hormigón armado, con armaduras en dirección longitudinal

problema térmico o si es necesario resolver la ecuación de transferencia de energía completa.

En algunos casos puede ser apropiado considerar los gradientes térmicos en la sección transversal de acero o el flujo de calor transmitido desde el acero al hormigón en soluciones constructivas como los suelos con encofrado de chapa perfilada o en elemento mixtos (ver las figuras 8 y 9). En ese caso se puede usar un modelo de elementos finitos.

El Eurocódigo 3 parte 1.2 permite resolver muchos problemas prácticos de una manera simplificada [1].

La información sobre la transferencia de calor se presenta tanto en el caso de elementos sin protección, como en el que existe dicha protección. Se consideran dos tipos de protecciones: materiales de aislamiento secos, y materiales que contienen una cantidad suficiente de humedad en su interior.

La publicación del ECCS "European Recommendations for Fire Safety of Steel Structures" [2] también ofrece una fórmula simplificada que expresa la relación entre el tiempo, t, de exposición al incendio normalizado (expresado en minutos), la temperatura crítica Ts,cr del elemento, el factor de la sección Am /A y las propiedades de los materiales del aislamiento, su espesor d y su conductividad térmica λ_i.

Para elementos sin protección la ecuación es:

$$t = 0{,}54\ (\theta_{cr} - 50)\ (A_m/A)^{-0{,}6}$$

Que puede ser resuelta de dos maneras:

$$\theta_{cr} = 1{,}85\ t\ (A_m/A)^{0{,}6} + 50$$

o

$$A_m/A = 0{,}36\ [(\theta_{cr} - 50)/t]^{1{,}67}$$

y que es valida para los siguientes rangos:

$$t = 10 \text{ a } 80 \text{ min}$$

$$\theta_{cr} = 400 \text{ a } 600^{\circ}C$$

Igualmente, para las secciones protegidas ligeramente con un material aislante, la ecuación es:

$$t = 40\,(\theta_{cr} - 140)\left[\frac{dA}{\lambda_i A_m}\right]^{0{,}77}$$

o

$$d = 0{,}0083\left(\frac{t}{\theta_{cr} - 140}\right)^{1{,}5} \cdot \frac{A_m}{A} \cdot \lambda_i$$

En la anterior ecuación d es el espesor de la protección (en metros) y λ_i es la conductividad térmica del material (en W/m°C).

Estas ecuaciones se pueden presentar en un diagrama, muy práctico para los proyectistas (figura 10).

La ecuación (4) contiene los tres principales factores de los cuales depende el aumento de temperatura del acero: el coeficiente total de

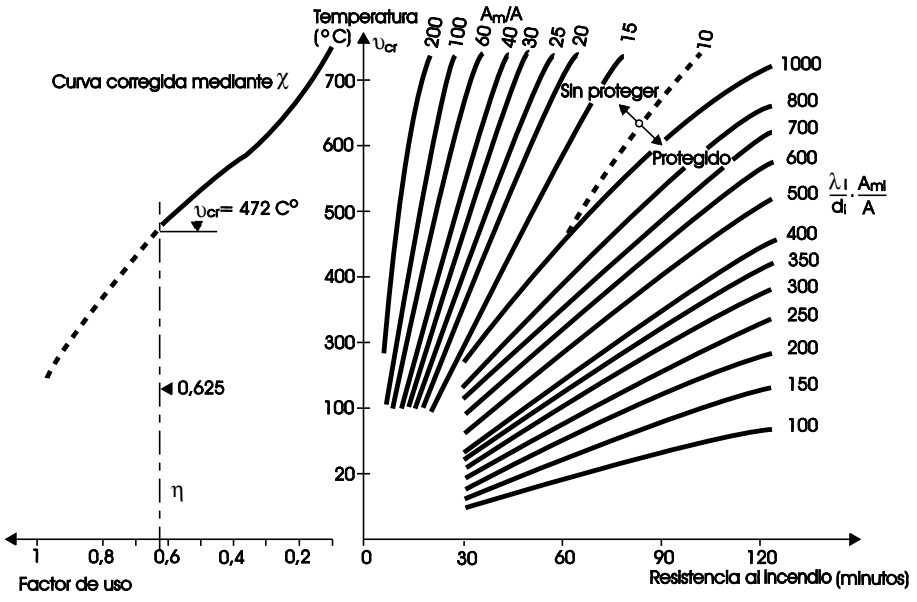


Figura 10 Relación entre el factor de uso, el factor de la sección y la resistencia al incendio

transferencia, el cociente entre el perímetro expuesto del elemento A_m y su sección transversal A; y la diferencia de temperaturas entre los gases calientes y el acero.

El coeficiente de transferencia de calor, K, depende de los coeficientes de transferencia por convección y radiación, α_c y α_r, y, si hay un aislante, de la conductividad térmica del material y de su espesor, de tal manera que:

$$K = \frac{1}{1/(\alpha_c + \alpha_r) + d/\lambda_i} \qquad (5)$$

Para condiciones normales de convención en un incendio (como las de un ensayo en un horno) el valor de α_c puede suponerse:

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{°C} \qquad (6)$$

mientras que α_r puede calcularse como:

$$\alpha_r = \frac{5,77\varepsilon_r}{\theta_f - \theta_s} \cdot \left[\frac{(\theta_s + 273)^4}{100^4} - \frac{(\theta_s + 273)^4}{100^4} \right]$$

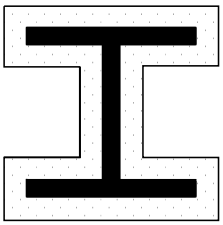
donde ε_r es la emisividad resultante de las llamas, los gases de combustión y la superficie del acero. Su valor puede suponerse tal como se muestra, de acuerdo con el Eurocódigo 3 [1]:

$$\varepsilon_r = 0,5$$

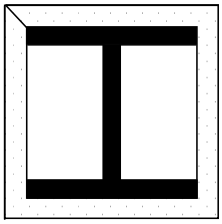
El valor del factor de la sección (A_m /A) puede variar en un abanico muy amplio. La velocidad de aumento de la temperatura en una sección pequeña y gruesa será pequeña, mientras que en una sección grande y delgada será más rápida.

Las diferencias entre los valores del factor de la sección es la principal causa del comportamiento de diferentes elementos expuestos al incendio. Si la inercia térmica es grande, el aumento de la temperatura será lento y la resistencia al incendio será mayor bajo las mismas cargas.

Los valores del factor de la sección pueden encontrarse en numerosas publicaciones. Debe hacerse notar que el factor de la sección representa el cociente entre la superficie efectiva expuesta al incendio y el volumen del elemento. Cuando se ha aplicado un protector, la superficie que debe tenerse en cuenta no es la superficie externa del perfil, sino la interior, como en el caso de un encapsulado (figura 7).



(1) Contorno envuelto o pulverizado $A_m/A = \frac{\text{Perímetro de la sección}}{\text{área de sección transversal}}$



(2) Envolvente tubular $A_m/A = \frac{\text{Perímetro interior de envolvente}}{\text{área de sección transversal}}$

Figura 7 Factores de sección para secciones aisladas

4. RESPUESTA TÉRMICA DE ELEMENTOS MIXTOS DE ACERO Y HORMIGÓN

4.1 Introducción

Se van a considerar dos tipos de elementos mixtos: los pilares y los forjados mixtos.

Para los pilares mixtos (figura 11), se distinguirá entre:

a. Perfiles en doble T envuelto por hormigón.
b. Perfiles laminados en doble T con hormigón entre la alas
c. Perfiles tubulares rellenos de hormigón, con o sin armaduras.

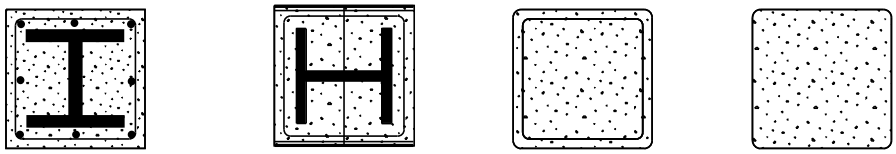


Figura 11 Secciones transversales típicas de pilares columnas

Para forjados mixtos, se limitará la exposición al caso de forjados mixtos con encofrado perdido de chapa perfilada. Algunas secciones típicas se muestran en la figura 12.

Las fórmulas se basan en los textos técnicos de la ECCS para el cálculo de la resistencia al incendio de pilares y forjados mixtos con encofrado perdido de chapa perfilada, expuesto al incendio normalizado [3, 4]. Estos textos técnicos reflejan el actual desarrollo de los conocimientos con base en las más recientes investigaciones.

4.2 Respuesta térmica de pilares mixtos

Se toma como punto de partida un pilar expuesto en todas sus caras a un incendio normalizado ISO. Se supondrá una distribución uniforme

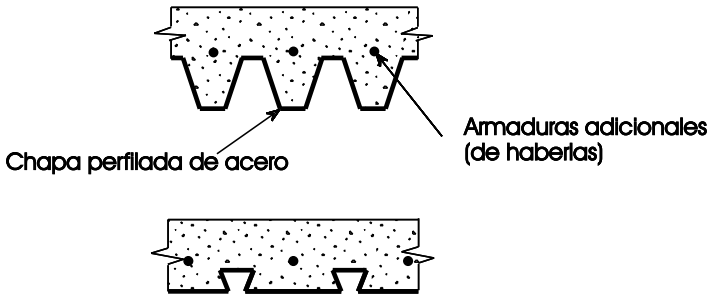


Figura 12 Secciones transversales típicas de forjados mixtos con encofrado perdido de chapa perfilada

de la temperatura a lo largo de la altura de la columna. Sin embargo, en condiciones prácticas, debe esperarse una distribución sustancialmente no uniforme de la temperatura en la sección transversal, tal como puede verse en la figura 13.

Como consecuencia, se deben usar modelos de flujo de calor dimensionales. El cálculo del campo de temperaturas en la sección transversal es sólo posible con un ordenador. En la práctica esto significa que se debe realizar un análisis térmico separado para cada sección transversal.

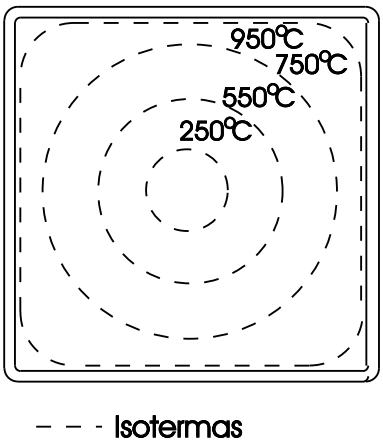


Figura 13 Medidas de la distribución de temperatura en la sección transversal de un pilar compuesto por una sección tubular de acero rellena de (200 x 200 x 6.3 m^3) después de 90 minutos de exposición a un incendio normalizado en sus cuatro caras

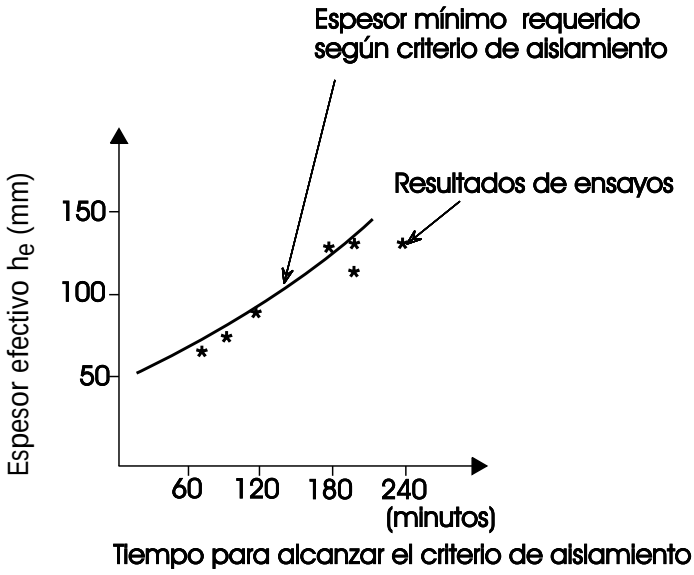


Figura 14 Mínimo espesor efectivo de un forjado para alcanzar el criterio de aislamiento (Δt – 140°C)

Al igual que con los pilares compuestos, es necesario usar un modelo bidimensional de transmisión del calor para los forjados mixtos. Estos modelos son demasiado elaborados para el diseño diario. Para solventar esta dificultad, el forjado mixtos se asimila a una losa plana con un espesor efectivo igual a una media ponderada de los espesores reales del forjado. Entonces, la distribución de temperaturas puede ser calculada para distintos períodos de exposición al incendio. De dichas distribuciones se puede deducir una regla para el cálculo del espesor mínimo del forjado para cumplir los criterios de aislamiento. Estas reglas se muestran en la figura 14, junto con algunos resultados de ensayos. Se puede ver como los resultados se encuentran del lado de la seguridad.

4.3 Respuesta térmica de forjados mixtos

Los forjados mixtos, en comparación con otros tradicionales, no sólo tienen una función portante, sino también una función de separación entre espacios. Como consecuencia, se deben tener en cuenta los criterios de aislamiento e integridad cuando se considera la determinación de la resistencia al incendio. Par forjados mixtos el criterio de integridad no es difícil de cumplir. Normalmente el forjado se hormigona en obra por lo que las juntas están adecuadamente selladas. Las fisuras que pueden existir en el hormigón no tienen importancia puesto que la chapa perfilada impide la penetración de las llamas o el humo. Para estos forjados no es necesaria una comprobación explícita de la integridad.

Los siguientes planteamientos deben considerar el análisis del criterio de aislamiento. Se han desarrollado reglas para la determinación de la distribución de temperaturas, puesto que dicha información es necesaria para evaluar la resistencia estructural. Estas reglas en el cálculo del refuerzo necesario, puesto que sin dicho refuerzo la resistencia de los forjados mixtos está en torno a los 30 minutos.

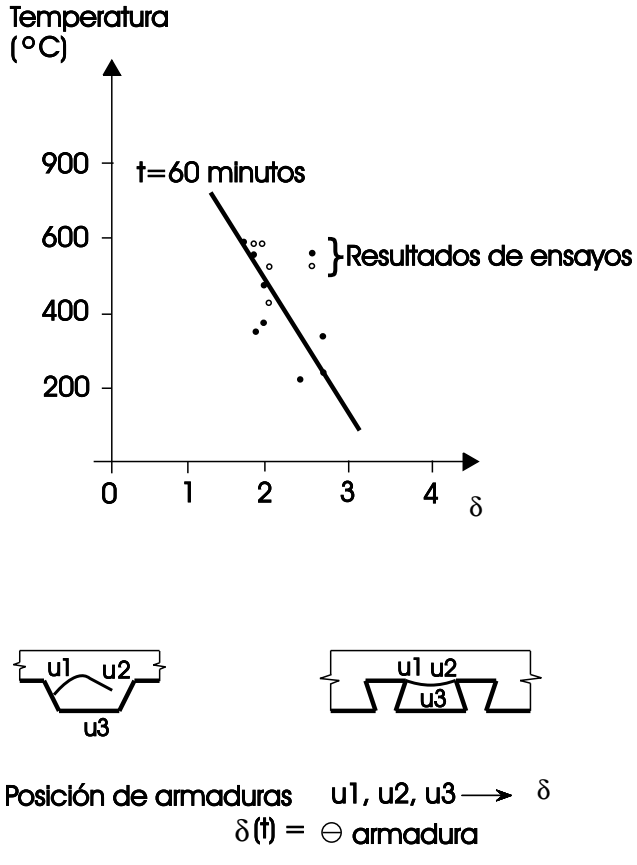


Figura 15 Temperatura en las armaduras adicionales

La temperatura del refuerzo adicional juega un papel fundamental en el análisis estructural. Por ello, se han determinado ecuaciones de las que puede obtenerse estas temperaturas como una función de la posición de las armaduras de refuerzo en la losa, (localización dada por u_1, u_2, u_3) y el período de exposición a un incendio normalizado. La figura 15 muestra los resultados de algunos ensayos de comprobación.

5. RESUMEN FINAL

- La respuesta de un elemento estructural expuesto a un incendio está gobernada por la velocidad de calentamiento, la cual está relacionada con el factor de la sección del elemento.
- La ecuación que refleja el comportamiento térmico de un elemento estructural es la ecuación de transferencia de calor de Fourier. La solución general de esta ecuación sólo es posible mediante métodos numéricos.
- En numerosos casos prácticos se pueden usar soluciones simplificadas para determinar la temperatura alcanzada por los perfiles estructurales bajo la acción de un incendio.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Eurocode 3 Part 1.2, “Structural Fire Design of Steel Structures” CEN .

[2] European Convention for Constructional Stelwork, “European Recommendations for Fire Safety of Steel Structures”, ECCS Publication 30, Elsevier, 1983.

[3] European Convention for Constructional Steelwork, “Calculation of the Fire Resistance of Composite Columns Exposed to the Standard Fire”, 1986.

[4] European Convention for Constructional Steelwork, “Calculation of the Fire Resistance of Composite Concrete Slabs with Profiled Steel Sheet Exposed to the Standard Fire”, 1984.

7. BIBLIOGRAFÍA ADICCIONAL

1. Eurocode 4 Part 1.2, “Structural Fire Design of Composite Structures” CEN

2. Quast, U., Hass, R. and Rudolph, K., “STABA/F, A Computer Programme for the Determination of Load Bearing and Deformation Behaviour of Uni-Axial Structural Elements under Fire Action”, Technical University of Braunschweig, March 1984.

3. Schleich, J. B., Dotreppe, J. C. and Franssen, J. M., “Numerical Simulations of Fire Resistance Tests and Steel and Composite Structural Elements or Frames“, Report presented at the First International Symposium on Fire Safety Science. Gaithersburg, Maryland, USA, October 1985.

ESDEP TOMO 6
PROTECCIÓN: INCENDIO

Lección 6.3: Principios de Análisis Estructural

OBJETIVOS/CONTENIDO

Se realizarán cálculos para la determinación de la capacidad resistente de los elementos estructurales sometidos a incrementos en sus temperatura. Se ofrecen directrices para el cálculo de la velocidad de calentamiento del acero y las estructuras mixtas durante un incendio.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 6.1: Introducción a la Seguridad ante el Incendio

Lección 8.3: Modos de Inestabilidad Elástica

LECCIONES AFINES

Lección 3.3: Propiedades físicas de los Aceros

Lección 6.2: Principios de Análisis Termodinámicos

Lección 16.2: Análisis de Pórticos: Análisis Plástico

RESUMEN

La resistencia última de un elementos estructural sometido a un incendio se calcula a partir de la carga aplicada durante dicho incendio y usando las teorías de plasticidad. Se diferenciará entre elementos sometidos a flexión y elementos comprimidos, así como entre secciones uniformemente calentadas y secciones con gradientes térmicos en su sección. Se presentarán los principales factores que influyen en la estabilidad durante un incendio. También se estudiará el comportamiento estructural de los pilares y forjados mixtos.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la temperatura del acero y el hormigón, en estructuras mixtas, conlleva un decremento en las propiedades mecánicas, como la tensión de fluencia, el módulo de Young, y la tensión de compresión última del hormigón (figuras 1 a 4). Por lo tanto, cuando un elemento de acero o mixto es sometido a un incendio sufre una disminución en su capacidad resistente. Si la duración e intensidad del incendio son lo suficientemente grandes, la capacidad resistente puede caer hasta el valor de las cargas aplicadas, teniendo lugar el colapso de la estructura (figura 5). Esta situación se representa de la siguiente manera:

$$P_u\ (\theta_{crit}) = P$$

donde:

P es la carga aplicada durante el incendio

$P_u\ (\theta_{cr})$ es la resistencia portante para una temperatura θ_{crit} (temperatura crítica), y

P_u es la resistencia a temperatura ambiente.

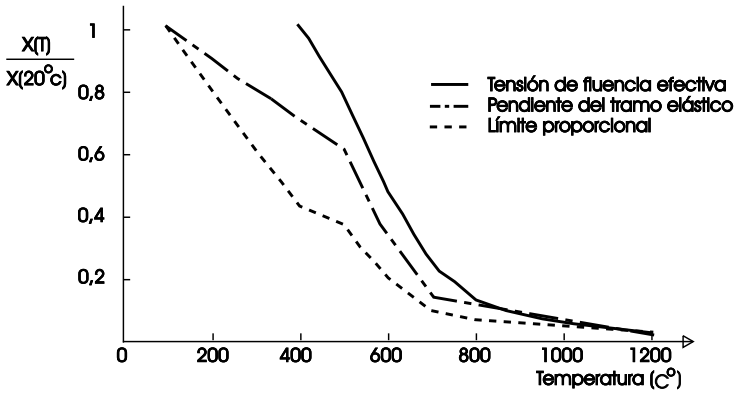


Figura 2 Resistencia del acero estructural a temperaturas elevadas

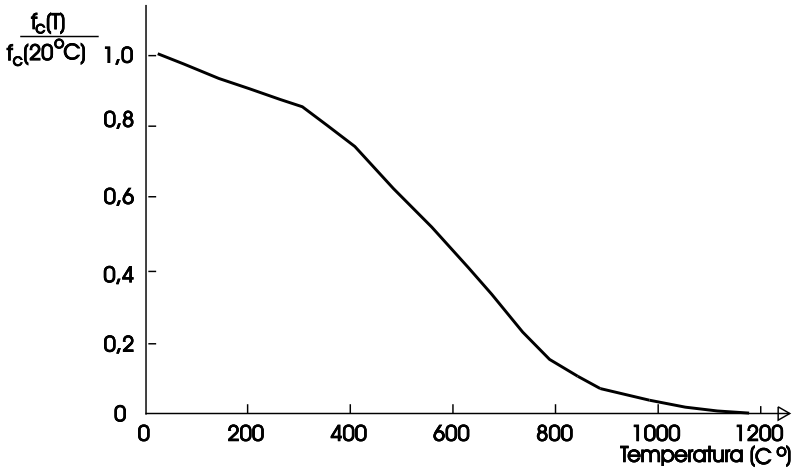


Figura 3 Resistencia a la compresión del acero

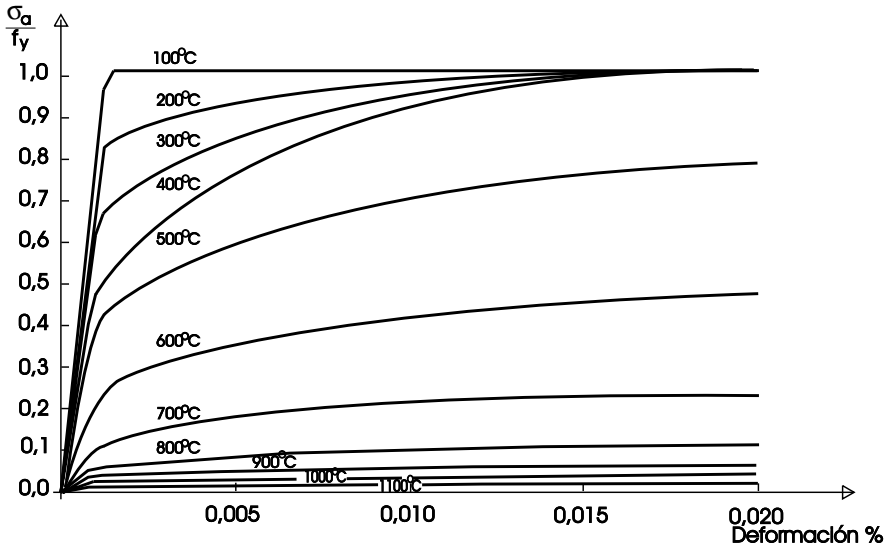


Figura 1 Curva tensión-deformación para el acero

El objetivo de esta lección es suministrar los principios de análisis estructural que gobiernan esta situación.

2. CARGA APLICADA

La carga aplicada se obtiene de la consideración de la combinación accidental de las acciones mecánicas tales como: peso muerto, cargas temporales, viento (sólo para los arriostramientos) y nieve.

Debido a la baja probabilidad de ocurrencia simultánea de un incendio y de niveles de carga severos, sólo se considerará la siguiente combinación accidental:

$$1{,}0\ G_K + \psi_1\ Q_{K,1} + \Sigma\ \psi_{2,i}\ Q_{K,i}$$

donde:

- G_K es el valor característico de las cargas permanentes
- $Q_{K,1}$ es el valor característico de las acciones variables principales
- $Q_{K,i}$ es el valor característico del resto de acciones variables
- ψ_1 es la frecuencia de las principales acciones variables
- $\psi_{2,i}$ es la media de la frecuencia de las otras acciones variables.

Generalmente, en un incendio: $\psi_1 = 0{,}5$ y $\psi_{2,i} = 0$

A parte de los arriostramientos, $Q_{K,1}$ y $Q_{K,2}$ corresponden a las cargas impuestas y a las cargas de nieves.

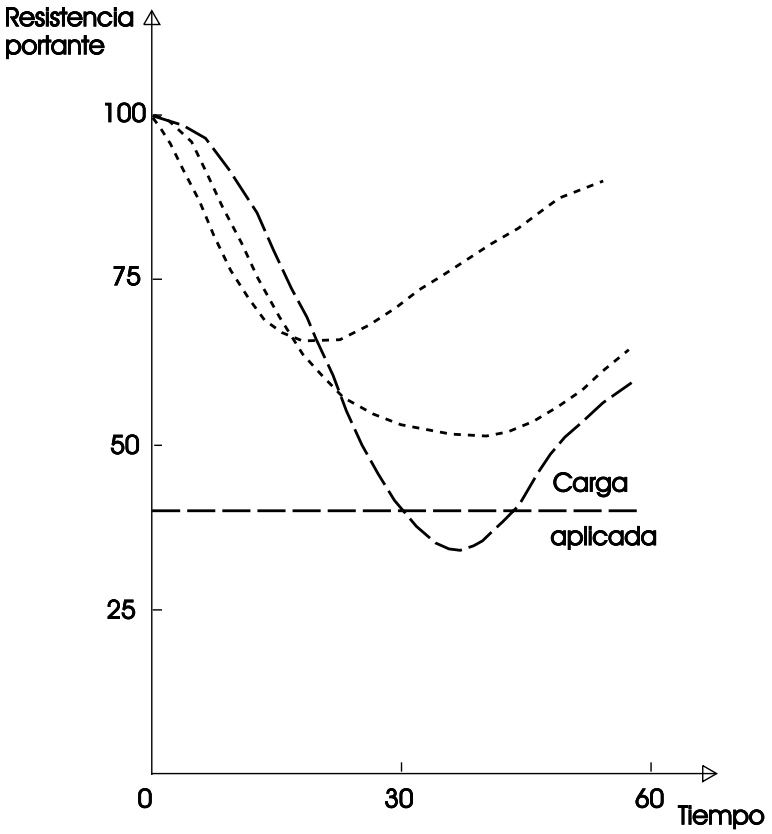


Figura 5 Ejemplos de disminución de la resistencia portante de una estructura durante la exposición a un incendio

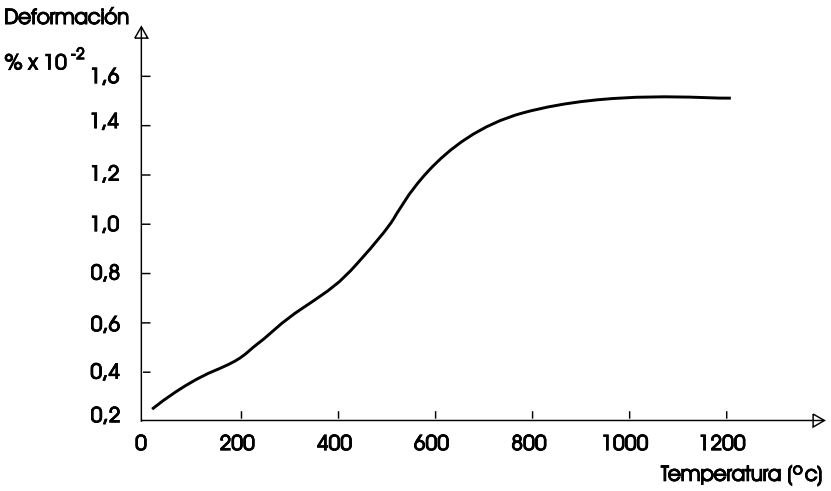


Figura 4 Deformación máxima del acero

3. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DURANTE UN INCENDIO

El cálculo de la capacidad resistente de una estructura sometida al incendio se puede efectuar de diferentes maneras, dependiendo del tipo de estructura y de los requerimientos de estabilidad durante el desarrollo del incendio.

El método de cálculo más simple es un análisis en el cual la estructura es representada por cada uno de sus elementos individuales expuestos al incendio directamente. En estos cálculos, las condiciones de contorno y de apoyo deben tomarse iguales a las normales durante el servicio. Las fuerzas externas y los momentos de cada elemento se deducen de un análisis estructural bajo condiciones de servicio normales.

Este tipo de análisis es generalmente suficiente cuando los requerimientos de estabilidad en un incendio se expresan en función de la duración frente a un incendio normalizado.

La capacidad resistente puede calcularse también a través de un análisis de parte o de toda la estructura, teniendo en cuenta la interacción entre varios elementos, la expansión, y la localización del incendio.

Este último tipo de análisis conduce a un conocimiento más exacto acerca del comportamiento de la estructura durante un incendio. No obstante, para estos cálculos se requiere el uso de un modelo numérico y de la asistencia de un ordenador.

4. CAPACIDAD RESISTENTE DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La temperatura crítica (θ_{crit}), que conduce al colapso de la estructura, se calcula suponiendo una distribución uniforme de la temperatura a través de la sección transversal de los elementos.

A continuación, se presentan varios ejemplos de cálculo de la temperatura crítica, en los que se usará la teoría de la plasticidad.

Se considerarán cuatro tipos de elementos: elementos sometidos a tracción, pilares, vigas y pilares-columnas [1].

4.1 Elementos sometidos a tracción

A temperatura ambiente, la tensión de resistencia última se expresa como:

$$N_p = A \cdot f_y$$

donde:

A es la sección transversal del elemento,

f_y es la tensión de fluencia

A una temperatura dada θ, uniforme en toda la sección, la resistencia última a tracción es:

$$N_p(\theta) = A \cdot \psi(\theta) \cdot f_y$$

$\psi(\theta)$ es la reducción de la resistencia a la temperatura θ, y se puede obtener de la figura 2.

El colapso del elemento se producirá a la temperatura crítica θ_{crit} en la cual:

$$N_p(\theta_{crit}) = N$$

donde: N = las cargas aplicadas en las condiciones de incendio.

Esta fórmula también puede expresarse como:

$$A \cdot \psi(\theta_{crit}) \cdot f_y = A \cdot \sigma$$

donde: σ = son las tensiones aplicadas en condiciones de incendio

Por lo tanto $\psi(\theta_{crit}) = \sigma/f_y$

o, $\psi(\theta_{crit}) = A\,\sigma/A.f_y = N/N_P = P/P_u$

Por lo tanto, conociendo P/P_u es posible determinar, usando la figura 2, el valor crítico de la temperatura del acero (θ_{crit}) para la cual $\psi(\theta_{crit})$ es igual a P/P_u.

4.2 Pilares

En este caso, se puede realizar un cálculo similar al de elementos sometidos a tracción, pero teniendo en cuenta los efectos del pandeo de los pilares. Este efecto se cuantifica a través de la modificación de la resistencia mediante un coeficiente de pandeo. Con objeto de correlacionar estos resultados en pilares con el comportamiento básico del acero a elevadas temperaturas, es necesario considerar un factor de corrección, κ, tal que:

$$\psi(\theta_{crit}) = \kappa\, P/P_u$$

Tanto P como P_u deben evaluarse usando un coeficiente de pandeo apropiado. Este coeficiente para un pilar sometido a una temperatura θ se expresa como:

$$\chi(\theta) = \frac{1}{\phi(\theta) + (\phi(\theta)^2 - \bar{\lambda}(\theta)^2)^{1/2}} \leq 1$$

donde: $\phi(\theta) = 0{,}5\,(1 + \alpha\,(\lambda(\theta) - 0{,}2) + \bar{\lambda}(\theta)^2)$

y $$\bar{\lambda}(\theta) = \frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{f_y(\theta)}{E(\theta)}} \approx \sqrt{\frac{f_y}{E}}$$

Las condiciones de sustentación del pilar deben tenerse en cuenta. Generalmente las partes frías de los extremos de un pilar conducen a un valor inferior de la esbeltez, λ, en comparación con el de las condiciones normales.

El valor del factor de corrección, κ, es igual a 1,2. Éste es usado para compensar la elección de f_y el cual está relacionado con la tensión efectiva de fluencia (nivel de tensión en el cual la curva tensión-deformación tiende hacia la plataforma plástica a ciertas temperaturas) y no la tensión de fluencia para una deformación del 0,2%.

4.3 Vigas

4.3.1 Vigas simplemente soportadas

El máximo momento flector para una viga simplemente apoyada y con una carga uniforme (de valor P por unidad de longitud) es:

$$M = PL/8$$

y su correspondiente tensión máxima es:

$$\sigma = M / S_e$$

donde:

S_e es el modulo elástico mínimo de la sección

Para alcanzar el colapso de acuerdo con la teoría plástica, es necesario que se forme una rótula plástica a mitad del vano. El fallo ocurrirá cuando al carga total de la viga es:

$$P_u = 8\ M_u/L$$

donde:

M_u es el momento flector resistente plástico dado por:

$$M_u = Z\ .\ f_y$$

siendo Z el módulo plástico de la sección

Cuando la temperatura es igual a θ, este momento flector resistente plástico es igual a:

$$M_u(\theta) = Z\ .\ \psi(\theta)\ .\ f_y$$

Para una viga sujeta a una carga P, el colapso ocurrirá a θ_{crit} cuando:

$$P_u(\theta_{crit}) = P \text{ o } M_u(\theta_{crit}) = M$$

es decir, cuando $\psi(\theta_{crit}) = S_e\ .\ \sigma/Z\ .\ f_y = \sigma/(f\ .\ f_y) = P/P_u$

donde $f = Z/S_e$ es el factor de forma de la sección ($\cong$ 1,10 a 1,3).

4.3.2 Viga continua

Cuando una viga está estáticamente indeterminada, se deben presentar más de una rotula plástica para obtener el colapso. Para vigas diseñadas elásticamente, se debe usar un coeficiente (χ) en el cálculo de la temperatura crítica en las condiciones de fallo. Este coeficiente refleja la redistribución de momentos en la estructura intermedia (análisis plástico).

Por ejemplo, una viga continua con tres apoyos, uniformemente cargada, tiene un máximo momento flector (M) en medio del vano, donde:

$$M = PL/8$$

es decir, igual al momento a mitad de vano de una viga simplemente apoyada.

Durante un incendio, se formará una rótula plástica en medio de los apoyos al aumentar la temperatura cuando:

$$M_u(\theta_1) = M$$

La viga simplemente apoyada fallaría a esta temperatura (θ_1), aunque una viga continua todavía necesita un incremento de temperatura hasta la θ_{crit} para que se forme otra rótula plástica en estos vanos (figura 6), precipitando el colapso de la viga.

La capacidad resistente de una viga continua es:

$$P_u(\theta_{crit}) = 12\ .\ M_u(\theta_{crit})/L$$

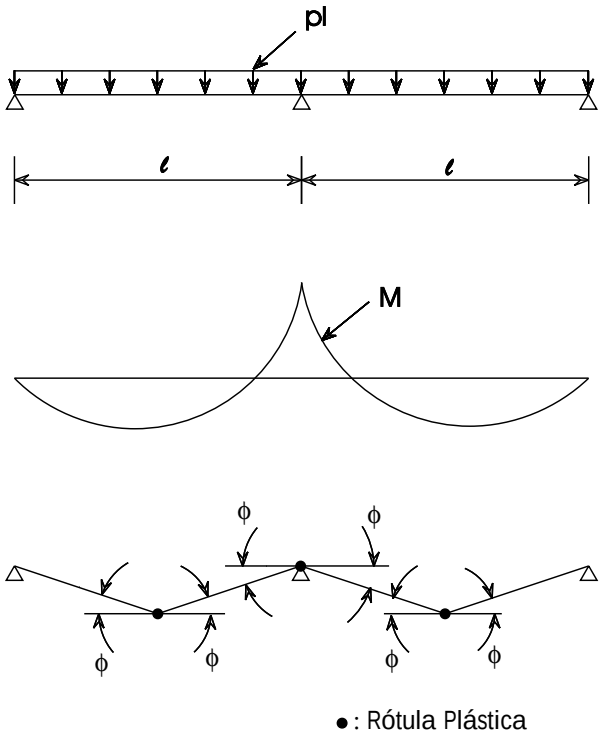


Figura 6

por lo que $\psi(\theta_{crit}) = 8.S_e.\sigma/12 \,.\, Z \,.\, fy = \frac{8}{12} \cdot \frac{\sigma}{f \cdot f_y}$ $= P/P_u$

El cociente 12/8 = 1,5 = χ es el coeficiente de indeterminación estática, o el coeficiente de redistribución plástico.

4.4 Viga pilar

Cuando una carga axial actúa conjuntamente con un momento flector en un mismo elemento estructural, su temperatura critica puede ser obtenida por la siguiente formula:

$$\psi(\theta_{crit}) = \frac{N}{\chi_{min} N_p} + \frac{k_y \cdot M_y}{M_{pl \cdot y}} + \frac{k_z \cdot M_z}{M_{pl \cdot y}}$$

donde:

χ_{min} es el menor de los coeficientes de pandeo χ_y y χ_z en torno a los ejes yy o zz y

k_y y k_z son los factores de reducción para los ejes yy y zz respectivamente (ver lecciones 9.6.1 y 9.6.2)

4.5 Parámetros principales

Los distintos parámetros que tienen una influencia importante sobre la temperatura crítica pueden deducirse del estudio de la fórmula anteriormente mencionada.

La fórmula general para elementos sometidos a flexión es:

$$\psi(\theta_{crit}) = \frac{\sigma}{\chi \cdot f \cdot f_y}$$

χ es el coeficiente presentado en la sección 4.3.2:

y para columnas y vigas columnas es:

$$\psi(\theta_{crit}) = \frac{N}{\chi_{min} N_p} + \Sigma \frac{k_i M_i}{M_{p \cdot i}}$$

Esto muestra que ψ disminuirá y consecuentemente la temperatura crítica aumentará, cuando:

- la tensión (= carga aplicada) disminuye o,
- la tensión de fluencia de la calidad del acero aumenta o,
- el factor de forma (f) aumenta,
- el coeficiente de indeterminación estática aumenta.

La temperatura crítica también puede incrementarse mediante el uso otras calidades de acero con un comportamiento mejor a altas temperaturas.

4.6 Elementos de acero con una distribución de temperaturas no uniforme

En la realidad es muy inusual que la temperatura a través y a lo largo de los elemento sea uniforme.

Los gradientes térmicos se deben a varias causas, por ejemplo, la presencia de un forjado o de una pared cerca del ala de un

perfil laminado, la localización del incendio, las conexiones entre pilares y vigas (lo que supone una concentración de acero), elementos colocados fuera del habitáculo incendiado, etc.. Estos gradientes tienen diferente influencia en el comportamiento mecánico de los elementos estructurales.

Para vigas, una temperatura inferior en el ala superior supone un incremento en el momento flector último (figura 7). Tratándose de vigas continuas, una temperatura menor en el área del apoyo intermedio contribuye a, bien un aumento en el intervalo de tiempo necesario para alcanzar la temperatura a la que aparece la rótula plástica, o bien, a un desplazamiento de la esta rótula hacia una sección transversal con un cociente óptimo entre momento flector y temperatura.

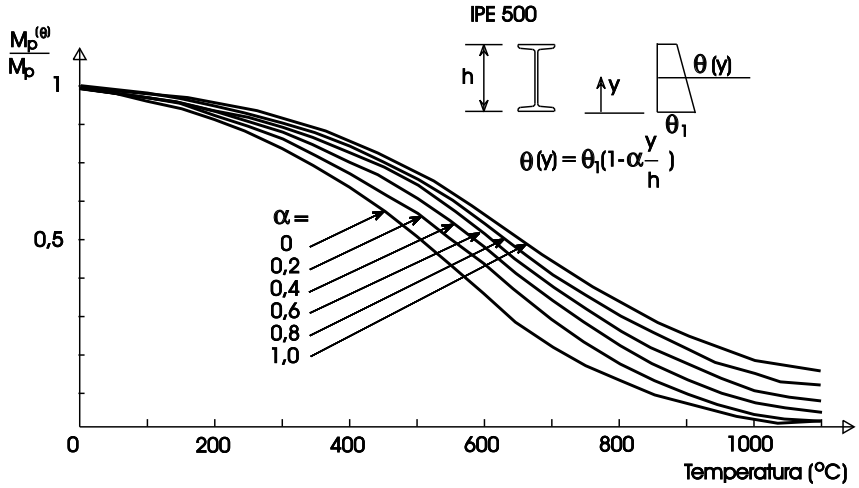


Figura 7

Por lo anterior, la reducción en la temperatura de cualquier parte de la viga provoca un incremento en su resistencia estructural.

Estos gradientes térmicos pueden cuantificarse, bien mediante el cálculo de la capacidad resistente tal como se explica en la sección 5 o usando un coeficiente global, llamado factor Kappa. El factor Kappa es un coeficiente global que mide la influencia benéfica de los gradientes térmicos para vigas. Con este propósito la fórmula general para una viga se convierte en [2]:

$$\psi(\theta_{crit}) = \frac{\kappa \cdot \sigma}{\chi \cdot f \cdot f_y}$$

donde:

κ = 1 para vigas simplemente apoyadas expuestas por todas sus caras

= 0,7 para vigas simplemente apoyadas expuestas por 3 lados

= 0,85 para vigas continuas expuestas por todos sus lados

= 0,60 para vigas continuas expuestas por 3 lados

Par pilares, una temperatura inferior en sus extremos hará decrecer la longitud de pandeo. Sin embargo, un gradiente térmico en la sección transversal, especialmente cuando esta sección se encuentra cerca de la altura media, causará una curvatura del pilar. Se creará un momento flector adicional, incrementando la tensión en el pilar. A pesar de ello, en general, el calentamiento no uniforme incrementa al resistencia de los pilares puesto que las partes más frías están en disposición de soportar más compresión.

5. CAPACIDAD RESISTENTE DE ELEMENTOS MIXTOS

Las secciones mixtas en las se combinan el acero y el hormigón, presentan gradientes térmicos cuando son calentadas por uno o varios de sus lados. La capacidad resistente de las vigas y los forjados se puede determinar haciendo uso de la teoría plástica. Para calcular dicha capacidad resistente en un elemento que experimenta un gradiente térmico, el método más simple consiste en dividir dicha sección en elementos con unas características mecánicas y una temperatura propias.

5.1 Viga mixta

Una viga mixta (perfil de acero y forjado de hormigón) generalmente presenta, en un determinado momento, el gradiente de temperatura mostrado en la figura 8.

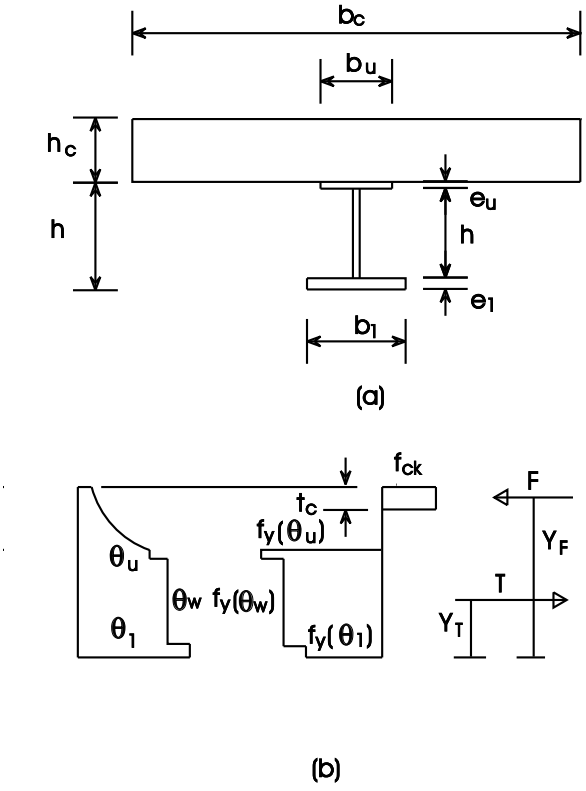


Figura 8 Comportamiento de una sección mixta tras exposición a un incendio

En la zona con un momento positivo, el momento flector último, suponiendo el eje neutro se encuentra en el espesor del forjado de hormigón, se calculará considerando el equilibrio entre las los esfuerzos de tracción (en el perfil de acero) y los de compresión (en la parte superior de hormigón).

La suma de los esfuerzos en las tres partes de la sección de acero es:

$$T = \sum_{i=1}^{3} A_i \psi(\theta_i) \cdot f_y$$

donde:

A_i es el área del ala inferior, del alma y del ala superior del perfil

θ_i es la temperatura representativa

El punto de aplicación de esta fuerza es el eje neutro plástico a elevada temperatura para las tres partes del perfil.

Con el objetivo de equilibrar la estos esfuerzos, una capa del forjado de hormigón se debe encontrar comprimido (figura 8b) de tal modo que:

$$T = C = b\ t\ R_c$$

donde:

b es la anchura efectiva del forjado.

t es el espesor de la zona comprimida

R_c es la resistencia última del hormigón

Esta ecuación es válida únicamente cuando la temperatura de la zona comprimida es aproximadamente uniforme. Si existe un fuerte gradiente térmico a lo largo del canto de esta zona, es necesario dividirla en diferentes capas en las que se presente una temperatura aproximadamente uniforme y sumar la contribución de dichas capas.

Sin embargo, normalmente estos forjados mixtos tienen que cumplir un requerimiento de aislamiento, o lo que es lo mismo, la temperatura de su cara externa debe ser inferior a 140°C.

A esta temperatura, se puede suponer que la resistencia del hormigón es la misma que a temperatura ambiente.

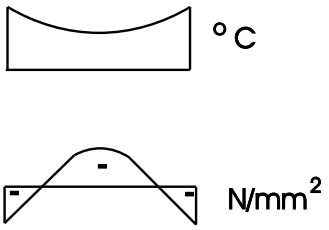
La resistencia última a flexión de la sección mixta es:

$$M^{+}_{u(\theta)} = T \cdot z$$

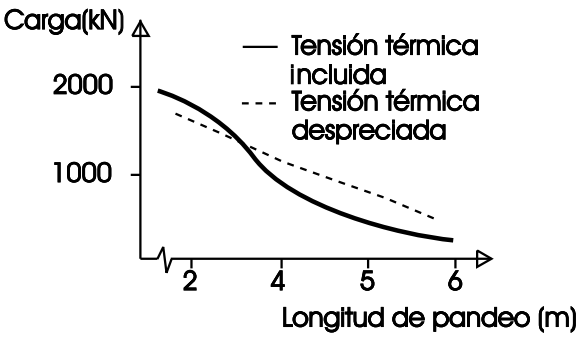
donde z es la distancia entre los puntos de aplicación de los esfuerzos de compresión y tracción.

Para vigas continuas, la determinación de la capacidad resistente completa también requiere el cálculo del momento flector plástico negativo ($M^{-}_{u(\theta)}$).

Para este momento flector negativo, el esfuerzo de tracción es soportado por las armaduras localizadas en la parte superior del forjado de hormigón y los esfuerzos de compresión los soporta el perfil y, si es necesario, por la parte inferior de la losa de hormigón.



(a) Distribución de temperatura y tensión (esquemática)



(b) Curva de pandeo a temperaturas elevadas

Figura 9 Efecto de la restricción a la expansión térmica sobre la capacidad portante de un pilar mixto de acero tubular relleno de hormigón expuesto a un incendio

En esta situación, se supone que la estabilidad en un incendio se mantiene si el momento flector isostático (M) de las cargas aplicadas en un vano es inferior o igual a la suma de loas resistencias flectoras positivas y negativas de la sección mixta, tal como sigue:

$$M^{+}_{u(\theta)} + M^{-}_{u(\theta)} \leq M$$

5.2 Forjados mixtos

El cálculo del comportamiento de un forjado mixto compuesto por losas de hormigón y chapa perfilada se realiza usando las mismas teorías que para los vigas mixtas.

La mayor modificación es que tras 30 minutos de exposición al incendio normalizado ISO, la chapa perfilada no se toma en cuanta para el cálculo del comportamiento mecánico del elemento.

En este caso, únicamente las armaduras se pueden usar para compensar las tensiones de tracción puesto que la resistencia a tracción del hormigón no contribuye a la capacidad resistente a elevadas temperaturas y es despreciada. La resistencia alcanzable para forjados sin armaduras suele limitarse a 30 minutos.

5.3 Pilares mixtos

La teoría plástica simple no puede ser usada para pilares (en contraste con las vigas y las losas) y se necesita un enfoque elasto-plástico incremental.

Para pilares mixtos se presenta otra complicación que es consecuencia directa de la distribución no uniforma de temperatura transversalmente en la sección. La distribución origina tensiones adicionales en la sección transversal debido a las restricciones para la expansión térmica (figura 9).

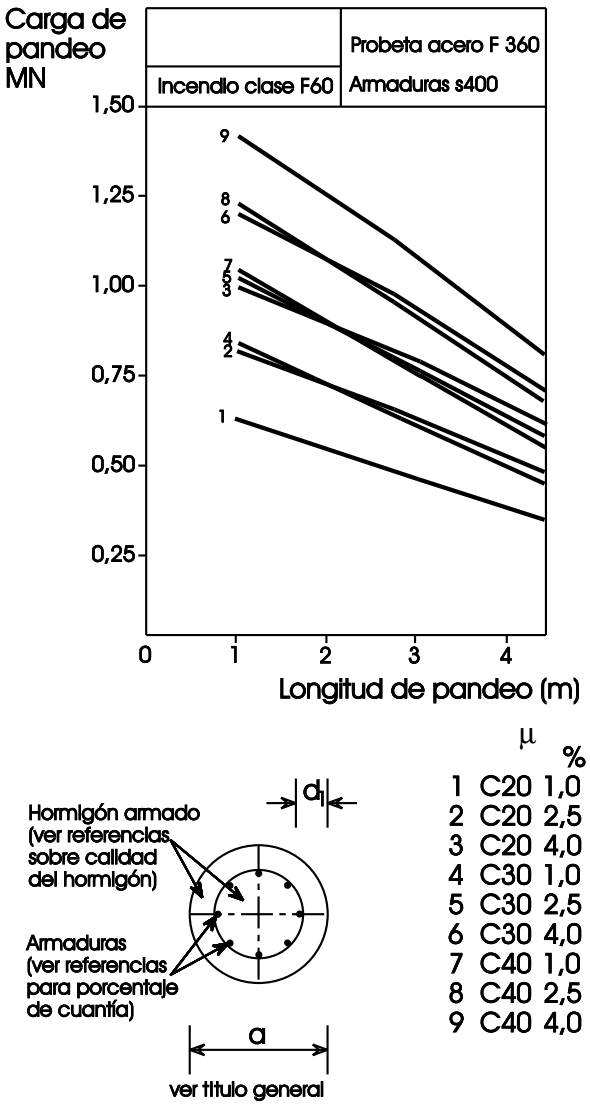


Figura 10 Curvas de pandeo para perfiles de acero de alta resistencia rellenos de hormigón tras 60 min. de exposición a incendio

Estas tensiones térmicas pueden tener una influencia significativa en la capacidad resistente de los pilares mixtos, tal como ha quedado reflejado en las curvas de pandeo (figura 9). Ambas curvas corresponden a secciones tubulares rellenas de hormigón, después de 90 minutos de exposición a un incendio normalizado. La curva continua está basada en un modelo de cálculo que tiene en cuenta las tensiones térmicas, la curva de puntos desprecia el efecto de dicha tensiones térmicas.

Consecuentemente, el análisis estructural de columnas mixtas debería basarse, idealmente, en modelos refinados, o lo que es lo mismo, en modelos que permitan un análisis térmico y mecánico preciso.

La complejidad numérica de dichos modelos se incrementa exponencialmente con la precisión exigida a dicho análisis. Esta complejidad tiene la desventaja, como por ejemplo los casos en los que la información de diseño exige un cuantioso número de cálculos. Por estas razones, se han desarrollado modelos limitados y aproximados. Éstos ocasionalmente requieren la introducción de factores de corrección semiempíricos. Los resultados obtenidos deberán tratarse con cuidado, y no se podrán extrapolar fuera del rango de aplicación de los experimentos en los que se basan.

La publicación del ECCS sobre el cálculo de la resistencia frente a un incendio de columnas compuestas suministra información de diseño en forma de curvas de pandeo para varias secciones transversales, perfiles y armaduras y para períodos de exposición al incendio normalizado de 30, 60, 90 y 120 minutos [3]. Un ejemplo de una hoja de diseño se encuentra en la figura 10.

6. CONEXIÓN ENTRE ELEMENTOS

No existe una dificultad especial en la determinación de la resistencia frente a un incendio de conexiones entre vigas y columnas. Debido a la concentración de acero en estas zonas, la temperatura de la conexión es inferior a la de los elementos adyacentes. Pueden considerar los efectos beneficiosos de la continuidad parcial de las vigas cuando existe una conexión que sólo se ha diseñado para soportar esfuerzos cortantes a temperatura ambiente.

7. RESUMEN FINAL

- El incremento de temperatura del acero y el hormigón conduce a un descenso de las propiedades mecánicas (modulo de Young, resistencia ala fluencia, resistencia última).
- las cargas aplicadas que deben considerarse en condiciones de incendio se obtienen de la combinación accidental de acciones.
- La temperatura crítica de los elementos es fácil de calcular igualando la capacidad resistente y las cargas aplicadas.
- Las columnas compuestas necesitan cálculos complicados pero existen gráficos de diseño para la aplicaciones habituales.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Barthelemmy, B. and Kruppa, J., “Résistance au feu des structures acier - béton -bois”, Eyrolles, 1988.

[2] European Convention for Constructional Steelwork, “European Recommendation for Fire Safety of Steel Structures”, Elsevier, Publication 30, 1983.

[3] European Convention for Constructional Steelwork, “Calculation of the Fire Resistance of Centrally Loaded Composite Steel-Concrete Columns Exposed to the Standard Fire”, Publication 55, 1988.,

9. BIBLIOGRAFÍA ADICCIONAL

1. Eurocode 3: “Design of Steel Structures”: Part 1.2: Structural Fire Design (in preparation).

2. Eurocode 4: “Design of Composite Structures”: Part 1.2: Structural Fire Design (in preparation).

3. Eurocode 1: Part 2.7: “Actions on Structures Exposed to Fire” (in preparation).

4. European Convention for Constructional Steelwork, “Calculation of the Fire Resistance of Composite Slabs with Profiled Steel Sheet Exposed to the Standard Fire”, Publication 32, 1984.

ESDEP TOMO 6
PROTECCIÓN: INCENDIO

Lección 6.4: Métodos Prácticos de Alcanzar la Resistencia al Incendio

OBJETIVOS/CONTENIDO

Se sondeará los medios prácticos de alcanzar la resistencia al fuego de estructuras de acero con ejemplos de su aplicación. Se describirán los principios esenciales de diseño contra fuego de estructuras en Europa.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 6.1: Introducción a la Seguridad ante el Incendio

LECCIONES AFINES

Lección 6.2: Principios de Análisis Termodinámico

Lección 6.3: Principios de Análisis Estructural

Lección 6.5: Ejemplos de Cálculo

RESUMEN

Las propiedades mecánicas de todos los materiales de construcción habituales decrecen con el incremento de temperatura. Los elementos de las estructuras de acero deben poseer una resistencia suficiente para evitar su colapso, la penetración de llama o el aumento excesivo de la temperatura en su lado no expuesto. Se estudiará la resistencia inherente de los materiales sin proteger, así como la influencia de diferentes sistemas de aislamiento y el comportamiento de elementos parcialmente expuestos y mixtos. También se tratara la influencia de la refrigeración por agua en el control de la temperatura de los elementos.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas de todos los materiales de construcción disminuyen al aumentar la temperatura. Los elementos estructurales deben poseer una resistencia y unas propiedades de estanqueidad que eviten la penetración del incendio o la propagación de la temperatura a otros recintos. La estabilidad de una estructura durante un incendio es especialmente importante y cualquier fallo de la estructura en la zona del incendio debe ser gradual, con deformaciones plásticas lo mayores posibles. Las zonas del edificio alejadas del incendio deben permanecer intactas.

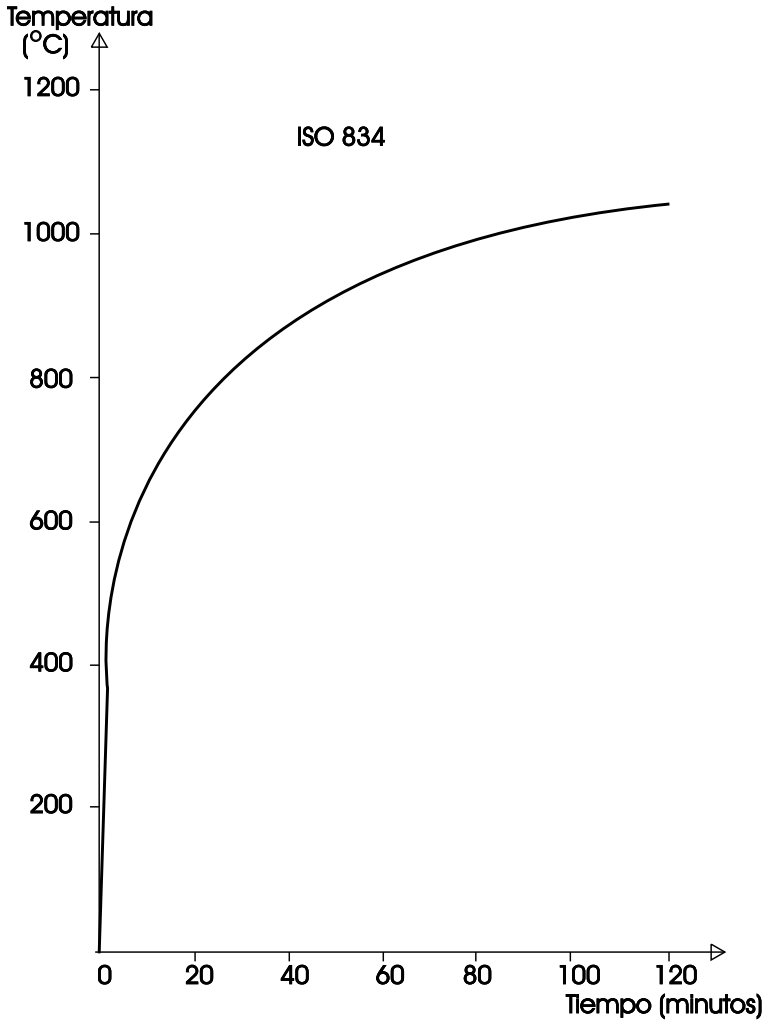


Figura 1 Curva normalizada de temperatura tiempo en un ensayo de incendio

Las exigencias de resistencia al incendio son fijadas por las Normas nacionales en términos de tiempo y un elemento aislado debe resistir la acción de un incendio normalizado como el definido por la curva de exposición de la norma ISO 834, (figura 1). Los tiempos de resistencia al incendio de 15/30/60/90/180 y 240 minutos se establecen teniendo en cuenta el número de plantas. Estos tiempos pueden ser también función del tipo de ocupación del edificio y de su carga de incendio.

Los elementos de acero colapsan durante un incendio si su temperatura alcanza un nivel "crítico". Esta temperatura crítica varía con las condiciones de carga, con el diseño utilizado para el estado de servicio y con la distribución de temperatura adoptada en la sección, pero normalmente varía entre los 500 y los 900°C.

La resistencia frente al incendio es el tiempo, durante un ensayo normalizado de acuerdo a la norma ISO 834, que tarda un elemento en alcanzar su temperatura crítica. Este período varía con el tamaño de la sección. En un edificio en el cual tiene lugar un incendio real la velocidad de calentamiento depende igualmente de la localización del elemento. Cuanto mayor sea el espesor del acero menor es la velocidad de calentamiento y mayor la resistencia al incendio.

La velocidad de calentamiento se cuantifica a través del factor de la sección, conocido como el cociente A_m /A, donde A_m es el perímetro del elemento expuesto al incendio, y A es el área transversal total de la sección. Consecuentemente, un elemento pesado con un bajo cociente A_m /A se calentará más despacio que un elemento ligero con un valor alto del factor de la sección. Existen distintas tablas publicadas que suministran el valor de los factores de la sección para distintos tamaños de sección.

Para que un elemento cumpla los requerimientos de resistencia, es necesario que la evolución de la temperatura durante el tiempo de resistencia (teniendo en cuenta su factor de su sección y su eventual aislamiento) es inferior que la temperatura crítica necesaria para causar el fallo (también conocido como “temperatura crítica”).

Para resistencias al incendio bajas (15, 30 minutos) se puede conseguir la estabilidad mediante una estructura desprotegida. Una resistencia de 60 minutos puede alcanzarse a veces sin aplicar ninguna protección mediante la utilización de la interacción estructural o térmica del acero y el hormigón. Para períodos mayores de resistencia, la estructura de acero puede protegerse mediante la aplicación de materiales aislantes, usando pantallas, o, en el caso de secciones tubulares estructurales, por la circulación de agua. Las estructuras mixtas pueden presentar una resistencia significativa.

Se estudiarán a continuación los métodos más simples de alcanzar altas resistencias al incendio en estructuras de acero. Se ha de reconocer, sin embargo, que se está realizando un considerable trabajo de investigación y desarrollo en Europa. Esta labor tiene como objetivo optimizar el proceso de diseño resistente al incendio de estructuras de acero que conduzca a reducciones en los costes de la construcción.

2. ESTRUCTURAS NO PROTEGIDAS

Las estructuras sin proteger pueden alcanzar resistencias al incendio de hasta 30 y 60 minutos si se cumplen más de una de las siguientes condiciones:

- bajo nivel de carga
- valores bajos del factor de la sección, A_m /A.
- alto grado de redundancia estática (puede influir el diseño de las conexiones).

La figura 2 muestra un ejemplo en el que la resistencia al incendio de vigas de acero no protegidas se presenta en función del factor de la sección, para diferentes valores del cociente entre la carga real y la de colapso en condiciones de temperatura ambientes.

Cuando el cociente entre la carga aplicada y la de colapso disminuye, la temperatura de fallo, y por lo tanto el tiempo de resistencia, se incrementa. La resistencia puede incrementarse, consecuentemente, incrementando el tamaño de los elementos, manteniendo el tamaño del elemento pero utilizando un acero de mayor resistencia, utilizando el efecto de las restricciones en las conexiones o, mediante la combinación de estos métodos.

Las velocidades de calentamiento de elementos expuestos pueden determinarse siguiendo las Recomendaciones Europeas [1, 2] que se han incorporado en el Eurocódigo 3[3]. Estos cálculos presuponen una distribución uniforme de temperaturas a lo largo del elemento. Sin embargo, las investigaciones han demostrado que la temperatura del perfil tiene una importante influencia en la resistencia a fuego cuando se presentan distribuciones de temperatura no uniformes. Por ejemplo, en una viga que soporte el peso de un forjado, la resistencia al incendio se incrementa debido a la transferencia de carga desde la parte más caliente hacia la más fría de la sección. Este efecto se tiene en cuenta por la modificación del factor `κ' en los métodos de cálculo.

En un incendio, el calor se transfiere al acero predominantemente por radiación y la velocidad de transferencia térmica está gobernada por la emisividad resultante ε_r. El valor de ε_r cambiará de acuerdo a las características del horno usado en los ensayos de incendio normalizados y de su posición relativa con respecto a las llamas. Valores típicos de ε_r se encuentran entre 0,3 y 0,5, siendo un valor inferior en un incremento de la resistencia al incendio medida. El efecto de esta variación en la resistencia de una viga no protegida se muestra en la figura 2.

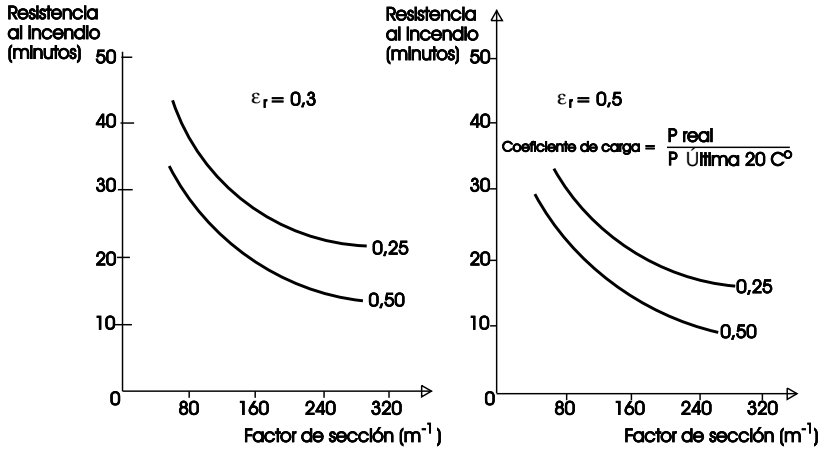


Figura 2 Resistencia al incendio de una viga de acero desprotegida como función del factor de la sección, diferentes niveles de carga y diferentes valores de emisividad

La resistencia de pilares de acero no protegidos expuestos al calor por los cuatro lados también depende del factor de la sección y de la carga aplicada. Los pilares no protegidos con valores del factor de la sección de hasta 30 m^{-1} tienen una resistencia a fuego de 30 minutos cuando trabajan a plena capacidad de carga, según el Eurocódigo 3 [3].

3. ESTRUCTURAS DE ACERO PROTEGIDAS

En muchos edificios con pórticos de acero, se necesita una protección estructural frente al incendio para poder cumplir las exigencias de la legislación y para prevenir el colapso de grandes componentes del edificio durante un hipotético incendio. Existe una amplia variedad de medios de protección. Las formas más genéricas, como hormigón, ladrillo y mampostería se usan con asiduidad. Los materiales disponibles también incluyen sustancias proyectables, productos "secos" con forma de losas o tableros, sustancias intumescentes que forman compuestos carbonosos cuando se exponen al calor, y compuestos que absorben el calor y que sufren cambios químicos en un incendio.

El espesor del aislamiento debe ser tal que la temperatura del acero durante el tiempo de resistencia (teniendo en cuenta su factor de sección) no exceda la temperatura crítica (o límite). Los estamentos de los gobiernos y los laboratorios privados oficialmente aprobados han establecido programas de ensayos de incendios para protecciones pasivas e intumescentes en especímenes cargados o descargados. Estos ensayos se han diseñado con el objetivo de determinar tanto las características de aislamiento de un material de protección como su comportamiento físico en las condiciones de un incendio para un amplio rango de tamaños de secciones de acero. Como resultado existen en la actualidad métodos analíticos de los cuales pueden obtenerse estimaciones fiables del espesor de protección medio. La protección contraincendios puede aplicarse a un elemento de la estructura de diferentes modos, tal y como se muestra en la figura 3.

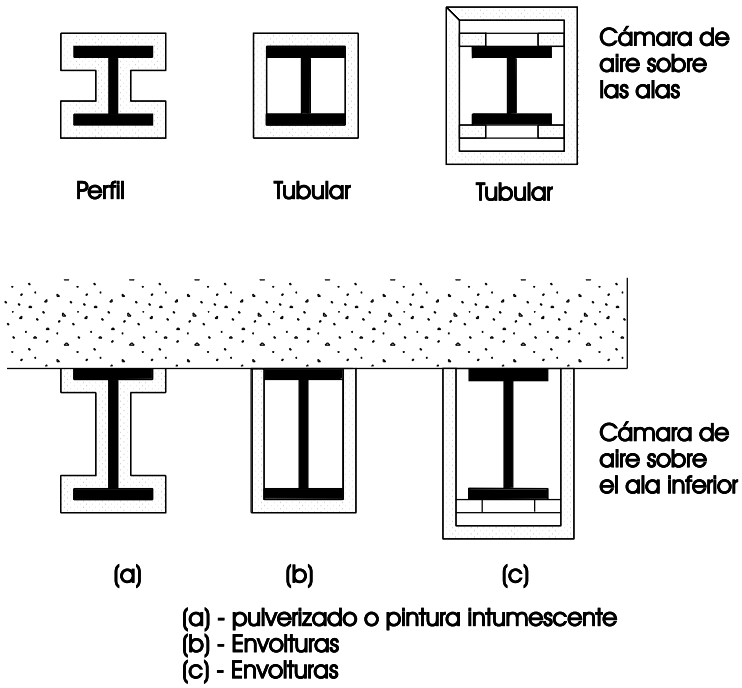


Figura 3 Formas de aplicar la protección contra el incendio

Protección pulverizada

La variedad de productos pulverizables incluye productos de fibras minerales, productos derivados de la vermiculita, los cuales incluyen o bien el cemento o bien en el yeso, productos de cementos perlíticos y compuestos químicos que absorben calor, como el oxiclorídico de magnesio. La mayoría de estos sistemas forma una mezcla que es bombeada a través de una boquilla en el substrato de acero. La mezcla de mineral de cemento y fibra se une al agua pulverizada en la cabeza de la boquilla. El espesor de estos materiales varía desde los 10 a 100 mm con densidades en el rango de los 200 kg/m^3 a los 1000 kg/m^3.

Para alcanzar el nivel deseado de protección contraincendios, es importante que se aplique el espesor de protección especificado. La inspección de la calidad del recubrimiento y la comprobación del espesor son, pues, necesarios. Sin embargo, no existe un criterio específico disponible para el número de comprobaciones necesarias y los límites de tolerancia aceptables.

Estos materiales pulverizables tienen varias ventajas. Son de aplicación rápida, baratos y pueden adaptarse a la protección de elementos que presenten geometría com-

pleja, incluyendo los espacios entre los forjados de chapa y las vigas de acero. Sus desventajas son el desorden que crean, pueden causar daños por exceso de pulverización y algunas veces sufren agrietamiento y contracciones. No suministran una apariencia superficial atractiva a menos que se les trate después.

Estos sistemas se aplican a elementos escondidos, como vigas sobre cubiertas suspendidas. Existe la posibilidad de utilizar el color para integrar estas capas con el aspecto arquitectónico de la estructura. La composición de la pulverización debe ser compatible con el substrato, ya sea acero imprimado o no.

Las características de abrasión y la resistencia al impacto se ven mejoradas si se aumenta su resistencia a la cohesión y su densidad. Estas protecciones son difíciles de reparar y por lo tanto es importante que cualquier material auxiliar que vaya a ser unido a la estructura lo sea antes de la aplicación de la protección.

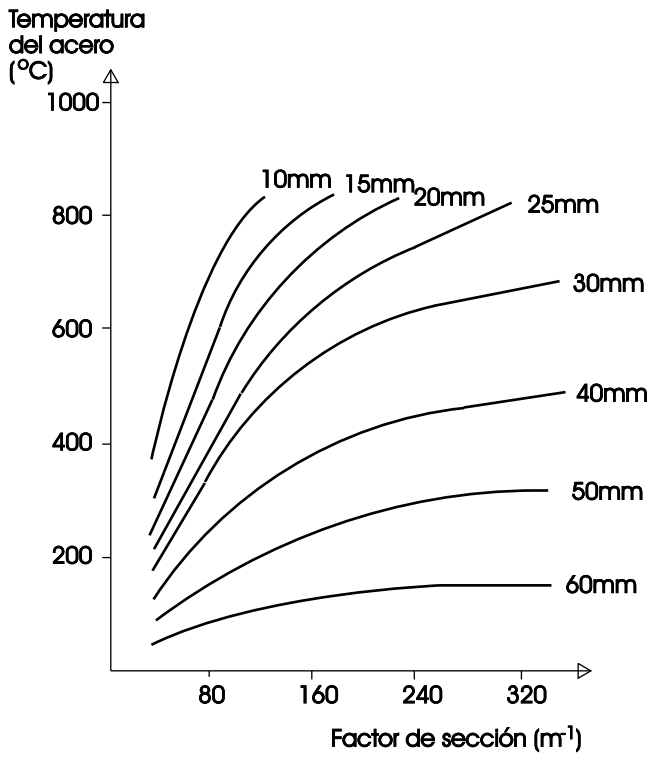


Figura 4 Cálculo del espesor de aislamiento requerido para una resistencia al incendio de 90 minutos

Sistemas Secos

Éstos incluyen sistemas basados en las fibras minerales o la vermiculita, placas de fibra mineral y lámina de fibras cerámicas. Los materiales derivados del cartón pueden ser adheridos en obra usando travesaños, atornillados a un pórtico a otras láminas. La densidad de estos materiales varía entre los 165 y los 800 kg/m^3.

Estos productos son fáciles de usar generalmente. La extensión de las labores de comprobación durante la instalación es menor que la necesaria en el caso de sustancias pulverizadas, puesto que estos productos se fabrican con espesores fiables. Ofrecen un cierto grado de flexibilidad en cuanto al programa en obra, son limpios, ocasionan muy pocos daños a las construcciones circundantes y presentan una superficie de acabado con mejor terminación. Algunos de estos productos son blandos y frágiles y son susceptibles de sufrir daños; otros pueden dañarse con el agua y por lo tanto sólo son apropiados para su uso en el interior de las edificaciones. La instalación no se adapta fácilmente a lugares de geometría compleja. Otro problema que puede presentarse es la incompatibilidad con cierto tipo de substratos.

Los últimos desarrollos han incrementado el uso de los materiales de fibra mineral. Éstos tiene una densidad en torno a los 100 kg/m^3 y se fijan mediante el uso de puntas, soldadas a intervalos a la superficie de acero, y con arandelas de sujeción.

Las propiedades deseables, tanto de los sistemas secos como de los pulverizables, son:

- buen aislamiento térmico, es decir, baja conductividad térmica y/o alta capacidad térmica.
- resistencia mecánica a los choques y los impactos.
- buena adherencia a los elementos, para prevenir la separación del material cuando se produzca el aumento de la temperatura y de la deformación de los elementos estructurales.

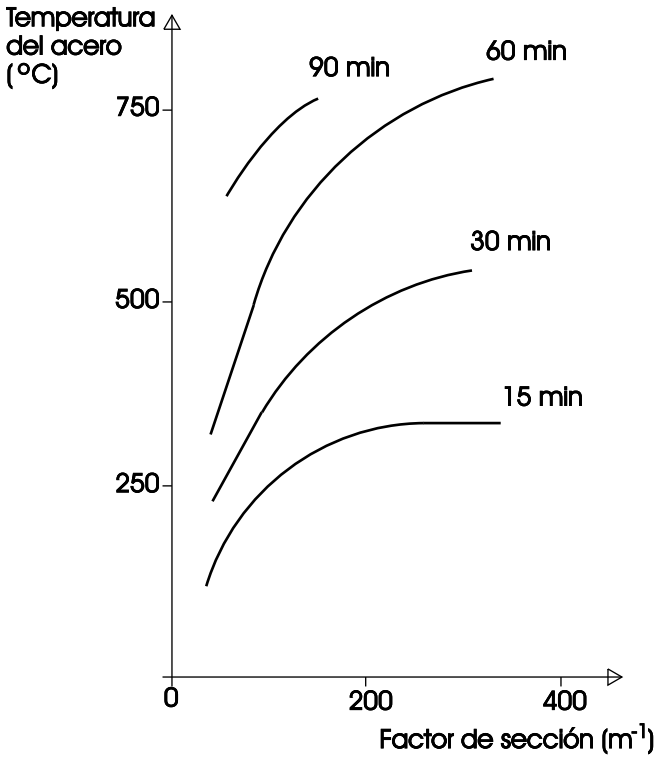


Figura 5 Protección suministrada por una sóla capa de espesor determinado de una pintura intumescente

Para facilitar el uso de los materiales pulverizables y de los paneles, los laboratorios de prevención de incendios han preparado gráficos especiales. Éstos pueden ofrecer el espesor de un determinado material en función del factor de la sección, la temperatura crítica del elemento de la estructura, y del período de resistencia a un incendio requerido, tal como en el ejemplo de la figura 4.

Sistemas Intumescentes

Estos materiales se usan con el objetivo de poder dar un aspecto decorativo a la estructura. Existe un abanico de pinturas de pequeño espesor que pueden permitir satisfacer resistencia durante un incendio de hasta 90 minutos. Estos productos son útiles fundamentalmente para uso en el interior de los edificios. Hay otras gamas de productos más gruesos, basados en productos químicos epoxi, que pueden alcanzar resistencias de hasta 120 minutos. Estas protecciones presentan características de curado adecuadas cuando se usan en el exterior.

Espesores típicos de pinturas intumescentes usadas sobre secciones en I

Las pinturas de capa delgada o las espumas se entumecen bajo la influencia del calor para dar lugar a un recubrimiento hasta 50 veces más grueso que la película original. Estos productos pueden aplicarse mediante pulverización, con brocha o con rodillo. Si se quiere aplicar capas de mayor espesor es necesario realizar varias aplicaciones. El espesor de película debe controlarse con los equipos especialmente desarrollados para este menester. Sólo se han realizado un limitado número de investigaciones sobre la durabilidad de estos productos, y como consecuencia en su adaptabilidad a medios externos. La mayoría de productos tienen una buena resistencia al impacto y a la abrasión.

En la figura 5 se ha representado simplificadamente la resistencia suministrada por películas de pintura intumescente.

Los ensayos han demostrado la necesidad de evaluar el comportamiento de las pinturas intumescentes a través de una variedad de secciones y orientaciones del sustrato. A largo plazo se puede anticipar que este sistema de

Tipo producto	Rango de espesores de pintura para diferentes periodos de resistencia al incendio* (mm)			
	30 min	60 min	90 min	120 min
Capas finas de disolventes	0,25 – 1,0	0,75 – 2,5	1,50 – 2,50	–
Capas gruesas resinas-epoxi	4,0 – 5,0	4,0 – 11,0	6,0 – 16,5	6,0 – 16,5

* Datos correspondientes a Gran Bretaña

protección contraincendios debería ser aplicado por el estructurista.

Aunque estos materiales tienen resistencia al impacto y a la abrasión, pueden ocurrir daños mecánicos, en particular en pilares, que requieran algún mantenimiento de pintura.

Especificación del espesor de protección contraincendios

En el Eurocódigo 3: Parte 10 [3] se da una ecuación para calcular el incremento de temperatura del acero protegido. La conductividad térmica del material de aislamiento, λ_i, y su espesor di se utilizan en la relación λ_i / d_i. La capacidad de resistencia al calor del aislamiento está también incluida. La conductividad térmica del material de aislamiento varía con su temperatura media. Este cambio puede considerarse en cálculos más precisos.

En cualquier caso, si no se dispone de información detallada y cuando se requiera solamente un cálculo aproximado, el cálculo puede basarse en valores medios de λi, que se consideren válidos para el rango de temperaturas durante el incendio. Se puede demostrar que en estas circunstancias el tiempo que se tarda en alcanzar una cierta temperatura en el acero viene dado por el factor $\frac{\lambda_i \cdot A_m}{d_i\, A}$.

El espesor de aislamiento requerido por un elemento metálico estructural se puede determinar utilizando un nomograma que relaciona temperatura crítica, carga aplicada, coeficiente de sección y resistencia al incendio. Por ejemplo, considerando una viga tipo IPE 500 con una relación de carga actuante/carga de colapso, η = 0,625 que requiera una resistencia al incendio de 120 minutos y expuesta al calor en tres de sus caras. El nomograma para acero protegido se muestra en la figura 6 para una viga simplemente apoyada que soporta una losa de hormigón (k factor of 0,7). El producto η x k = 0,625 x 0,7 = 0,438 y el coeficiente de sección, A_m /A = 132 m^{-1}, para una viga expuesta al calor en tres de sus caras.

Del nomograma el valor que se obtiene para el factor $\frac{\lambda_i \cdot A_m}{d_i\, A}$ es 690 W/(m^3.K) para los 120 min de resistencia al incendio con η x k = 0,438

$$\frac{d_i}{A_i} \geq \frac{132}{690} = 0{,}19\,\frac{m^2\,{}^{o}C}{W} \qquad (1)$$

Los factores de la conductividad térmica, λ_i, se pueden conseguir de los datos de los fabricantes y se dan ejemplos en el nomograma. Por ejemplo, cuando λ_i = 0,1 W/m°C (típico para muchos materiales de protección), el espesor requerido de aislamiento es, $d_i \geq 0{,}1 \times 0{,}19$ = 19 mm.

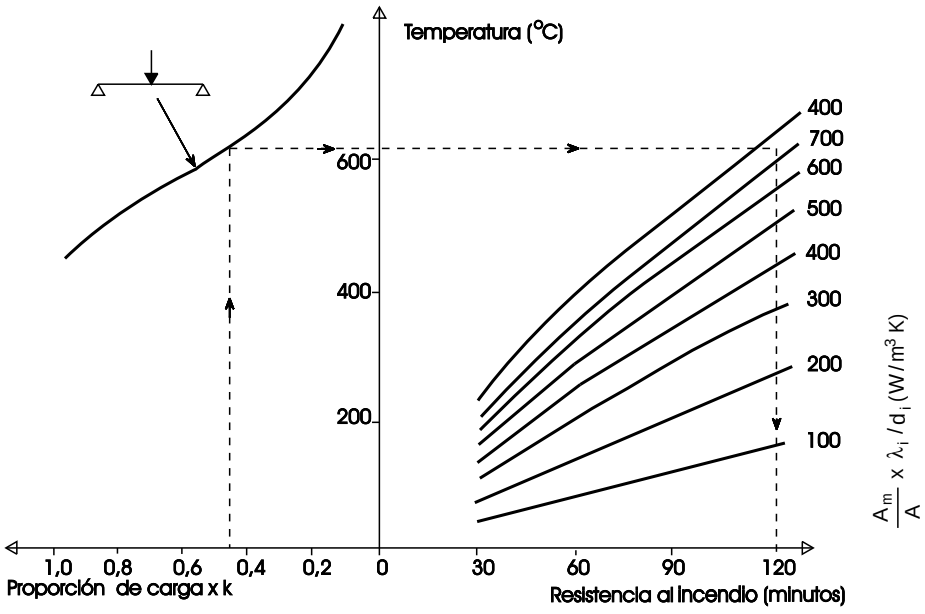


Figura 6 Uso de nomograma para ver el espesor de aislamiento requerido

4. CONSTRUCCIÓN MIXTA

El uso de elementos mixtos de acero/hormigón en edificación está en continuo crecimiento en el diseño de estructuras resistentes al fuego porque ofrecen distintas alternativas a los factores que influyen en el incremento de temperatura del acero [4, 5]. Una es la disposición y el volumen del hormigón y otra es la posibilidad de redistribuir las tensiones internas en las partes protegidas y más frías de la sección.

Pilares de acero huecos rellenos de hormigón

La sección transversal de este tipo de pilares es rectangular o circular, como se muestra en la Figura 7 (a, b, c). Su función en caso de incendio depende principalmente del tamaño y de las propiedades a tracción y flexión del hormigón. Si se utiliza hormigón en masa la resistencia al incendio es normalmente de 30 minutos (Figura 7a). En cualquier caso, se puede alcanzar un tiempo de resistencia al incendio de 120 minutos añadiendo armadura o refuerzo de fibra de acero (Figura 7b).

Los pilares de núcleo macizo de acero revestidos de hormigón (Figura 7c) son un diseño más avanzado de las secciones de acero huecas rellenas de hormigón, pero en las que la sección transversal de acero que soporta la parte principal de las cargas se encuentra protegida contra el fuego por capas de hormigón. La resistencia al fuego de este tipo de pilares varía

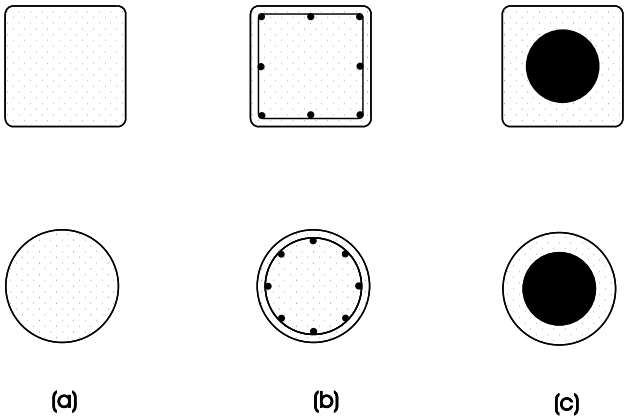


Figura 7 Pilares y columnas tubulares rellenas de hormigón

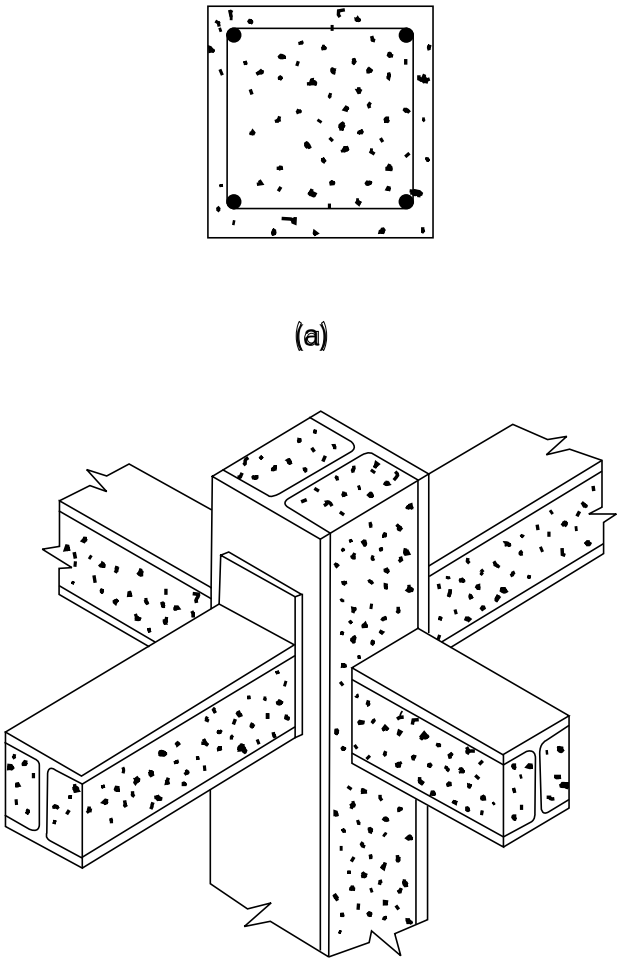


Figura 8a Secciones cubiertas parcial o totalmente por hormigón

desde 60 minutos a valores mayores, dependiendo del espesor del hormigón. Estos pilares se utilizan con carga centrada con pequeñas cargas excéntricas.

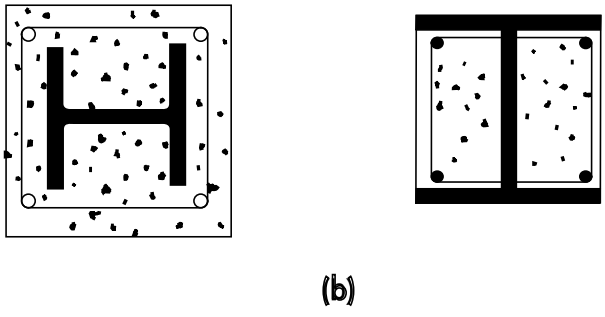


Figura 8b Secciones cubiertas parcial o totalmente por hormigón

Perfiles laminados revestidos de hormigón

Algunos tipos de estructuras mixtas en las que los perfiles metálicos de vigas y pilares se fabrican resistentes al incendio.

Una de las grandes ventajas de los pilares mixtos son las uniformes dimensiones exteriores de las secciones transversales en edificaciones de gran altura. Variando los espesores de la sección de acero, las calidades de los materiales de acero y hormigón, y la cuantía de armado, la sección transversal de los pilares puede adaptarse para soportar una carga creciente sin cambios significativos de las dimensiones exteriores. Cada tipo de pilar mixto tiene ventajas específicas y rangos de aplicación.

La más antigua tipología de pilar, Figura 8a, es la sección transversal de acero rellena de hormigón. Sus ventajas son un alto nivel resistencia a cargas en condiciones de incendio y una alta capacidad de soporte de cargas, no sólo en el caso de cargas centradas, sino también para momentos flectores. La resistencia al incendio es normalmente de 90 minutos o mayor.

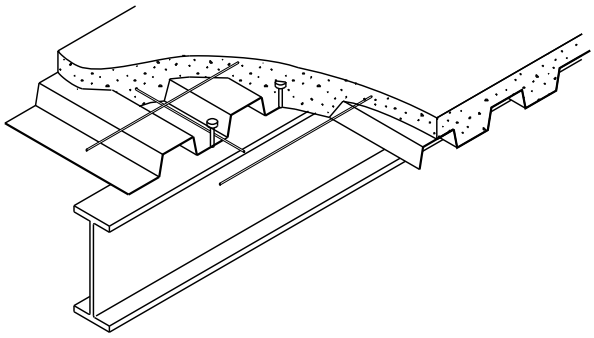


Figura 9 Forjados mixtos con encofrado perdido de chapa perfilada

La segunda tipología, formada por sección de acero con hormigón en el interior de las alas, puede soportar cargas centradas considerables y momentos flectores elevados. La cantidad de encofrado se reduce significativamente. Otras ventajas son una buena resistencia a daños mecánicos sin necesidad de refuerzos en las esquinas y la posibilidad de utilizar nudos de acero convencionales entre pilares y vigas metálicas rellenas de hormigón de forma análoga entre alas, como se indica en la Figura 8b. Tales secciones mixtas pueden alcanzar cualquier nivel de resistencia a fuego que se desee.

Forjados mixtos

Los forjados mixtos en los que se utiliza chapa de acero perfilada son de uso muy frecuente en edificación, como se muestra en la Figura 9. Estos forjados pueden alcanzar una resistencia al incendio superior a cuatro horas sin aplicar ninguna protección al techo. Forjados con cuantías mínimas de armadura tienen una resistencia a fuego de al menos 30 minutos y una capa simple de armadura puede proporcionar una resistencia al incendio mayor de dos horas. Para tiempos mayores de resistencia al incendio para forjados con altas cargas y grandes vanos puede ser necesaria armadura adicional.

5. SECCIONES DE ACERO PARCIALMENTE EXPUESTAS

Elementos parcialmente expuestos por estar embebidos en muros, forjados u otros elementos estructurales alcanzan una significativa resistencia al incendio redistribuyendo la tensión de las zonas de la sección expuestas al calor a las más frías (no expuestas). Este efecto ocurre haya o no efecto de interacción de estructura mixta. Se están dedicando recursos para cuantificar este efecto.

Un método relativamente económico para mejorar la resistencia al incendio de pilares de sección de acero en doble T en cualquier ubicación, consiste en cerrar el hueco entre alas y alma con bloques ligeros prefabricados de hormigón, no resistente a las cargas, fijado al acero mediante mortero, como se muestra en la Figura 10. Ensayos de fuego han demostrado que pilares metálicos de columnas universales (UC) de tamaño de sección 203 mm x 203 mm x 52 kg/m y superiores alcanzan un incremento de la resistencia a fuego de 30 minutos bajo carga total de cálculo.

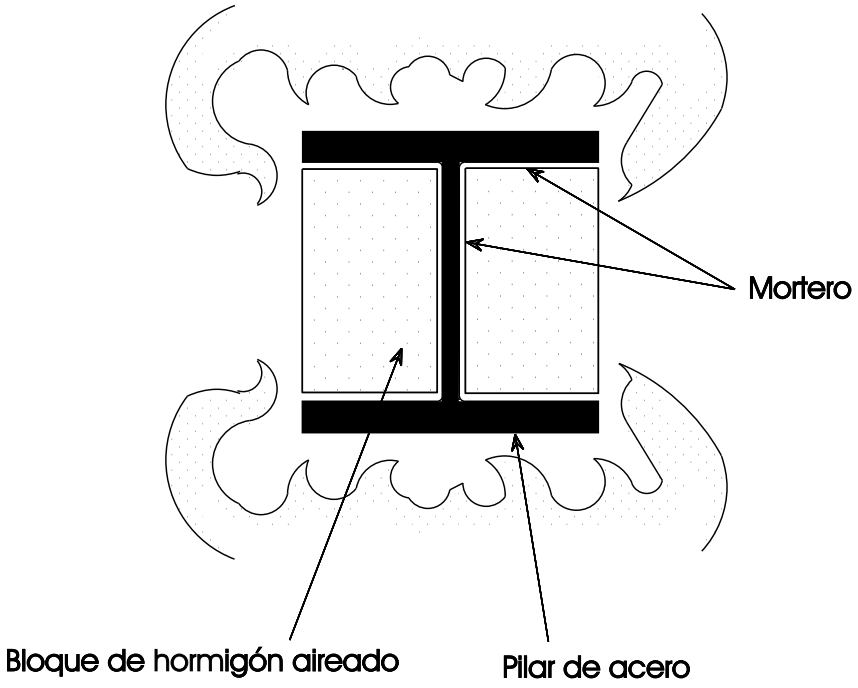


Figura 10 Pilar de acero con el alma bloqueada

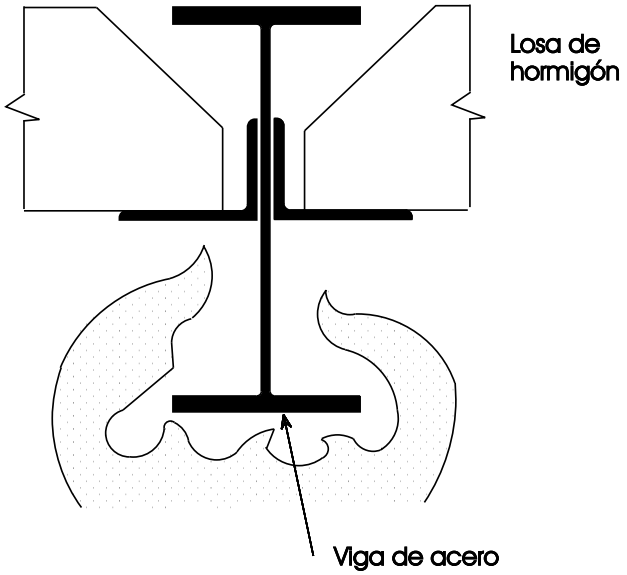


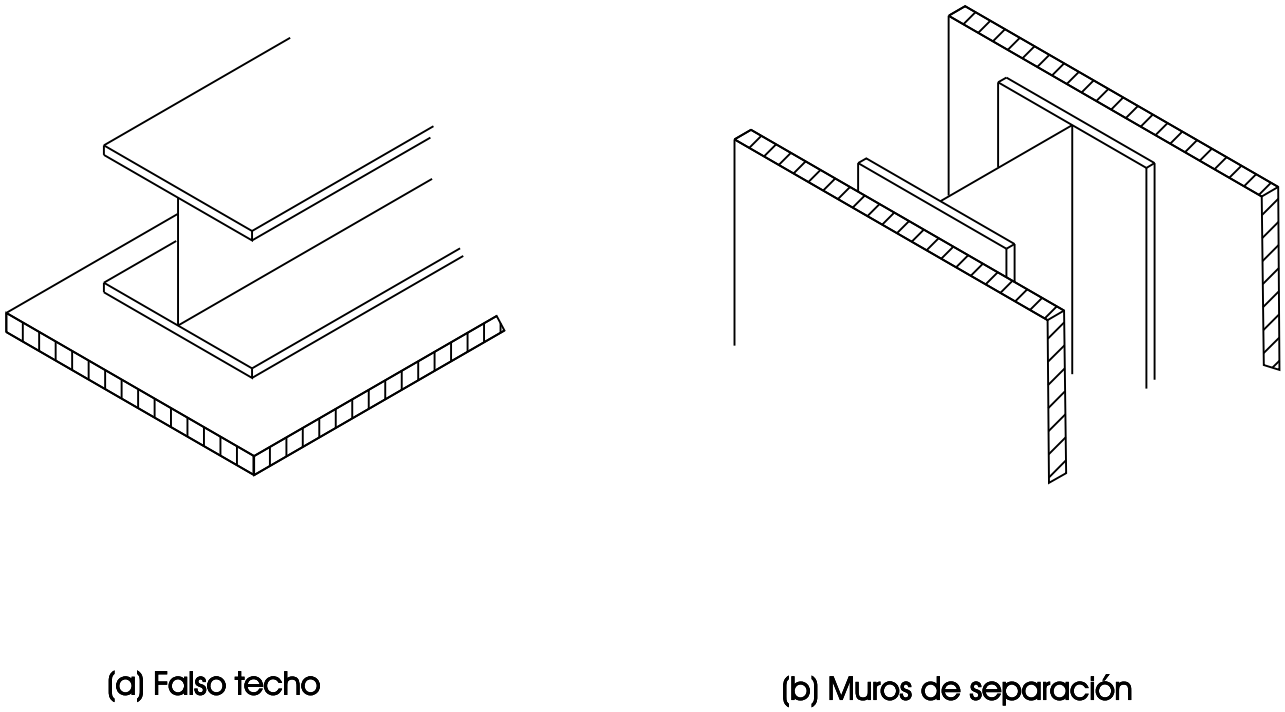
Figura 11 Disposición de forjado con angular sujeto a viga

Otro ejemplo particular es el casquillo de angular soporte de forjado que se muestra en la Figura 11. El tiempo que tarda una viga metálica en alcanzar su temperatura límite en un incendio se puede aumentar protegiendo la viga de la acción directa de las llamas. Un método económico de proveer esta protección es por medio de un casquillo de angular fijado al alma de la viga donde la losa prefabricada del forjado de hormigón apoya, protegiendo así del incendio el ala superior y parte del alma de la viga. La disminución de calor producida en la parte superior de la viga aumenta significativamente el tiempo de resistencia a fuego de la viga de acero.

Resultados de investigaciones indican que seleccionando combinaciones adecuadas de tamaño de la sección de acero y del canto de la losa de hormigón, se pueden conseguir tiempos de resistencia al incendio de 30, 60 y 90 minutos sin necesidad de utilizar protecciones aligeradas resistentes al incendio.

6. PROTECCIÓN MEDIANTE PANTALLAS

No es necesario aplicar protección a cada elemento de la estructura de un edificio de acero durante su ejecución. Cuando se ejecutan falsos techos o tabiquería (Figura 12) pueden ofrecer ventajas económicas combinando su función habitual con la de resistencia al incendio. Las particiones tienen que ser capaces de asegurar la integridad, el aislamiento y la estabilidad necesaria para impedir que el incendio se extienda a la zona hueca. Se debe prestar espacial atención a la forma de ensamblar y en especial a las juntas y uniones. Se puede conseguir cualquier nivel de resistencia a fuego que se requiera.



(a) Falso techo

(b) Muros de separación

Figura 12 Pantallas contra incendios

7. ESTRUCTURA EXTERIOR

Los pilares situados al exterior del edificio permanecen más fríos durante el incendio que aquellos situados al interior. De este modo se alcanzan estabilidades al incendio superiores a 30 minutos. Los métodos de cálculo existentes para el comportamiento mecánico de elementos cargados en caso de incendio conducen a las siguientes recomendaciones:

- la mejor disposición de pilares es la más alejada de las puertas, protegidos por un muro que tenga una resistencia al fuego adecuada, como se indica en la Figura 13, o protegidas por una pantalla cuando el pilar esté situado frente a una ventana.

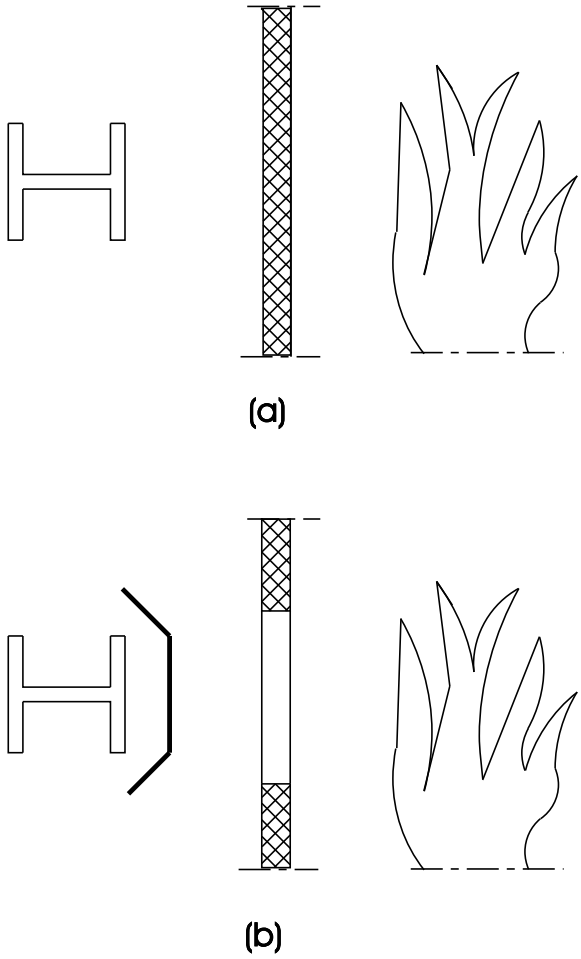
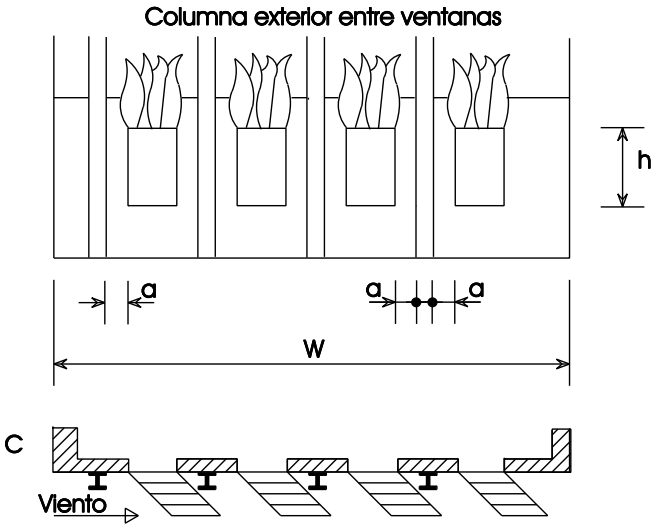


Figura 13 Columna en el exterior



Planta - muestra desviación de las llamas por el viento
A = a o C, el que sea mayor

Altura de ventana h (mm)	Valores de A para ancho compartimento W (m)			
	9	18	36	72
1	1,4	2,3	2,3	2,3
2	0,8	1,1	1,1	1,1
3	0,6	0,8	1,0	1,0
4	0,3	0,7	0,9	0,9
5	0,3	0,7	0,8	0,8

Figura 14 Ejemplo de diseño de columnas exteriores entre ventanas

- si hubiera riesgo de condiciones severas de temperatura, las uniones entre vigas y columnas deben ser preferentemente rígidas.

- generalmente, las vigas de soporte de forjado no necesitan protección en sus caras exteriores.

Un diseño simplificado se muestra en la Figura 14. Es adecuada la posición de los pilares exteriores para evitar un excesivo incremento de temperatura para un edificio que tiene todas las ventanas en una fachada no expuesta al viento.

8. REFRIGERACIÓN POR CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA

La resistencia al incendio de elementos tubulares puede mejorarse utilizando el hueco interior de los tubos para enfriar el acero estructural. Llenando estos elementos con agua se obtiene una muy alta resistencia al incendio mientras se mantiene la circulación de agua, Figura 15.

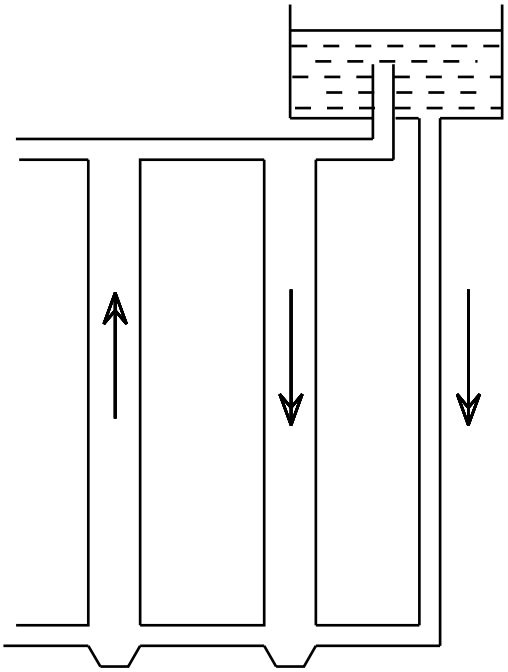


Figura 15 Perfiles tubulares rellenos de agua

Se puede conseguir la circulación por convección natural utilizando un cierto número de elementos de interconexión (no todos ello expuestos al fuego) con un cierto número de tanques de almacenamiento, conectados directamente a dispositivos de agua y drenaje o por medio de bombas. Las investigaciones se hacen habitualmente en circuitos estáticos irrellenables. Se añaden al agua productos químicos que eviten la corrosión (nitrato potásico) y refrigerantes (carbonato potásico). En cualquier sistema, aunque la temperatura del agua puede exceder los 100° C dependiendo de la presión, el acero permanecerá por debajo de su temperatura crítica.

La apariencia exterior de la estructura de acero no se ve afectada, lo que supone una ventaja arquitectónica. El diseño es, en cualquier caso, complejo y el método caro. Se utiliza habitualmente en edificios singulares o en estructuras que requieran elevados nivel de resistencia al incendio.

Las vigas y pilares de perfiles laminados se pueden enfriar mediante rociadores de agua. El proceso se activa cuando la temperatura ambiente excede un valor predeterminado. El flujo de agua producido por un cierto número de rociadores tiene que proyectarse de manera continuada a lo largo de toda la longitud del elemento.

9. RESUMEN FINAL

- El factor de calentamiento de un perfil de acero se especifica por el factor de sección, A_m/A. Factores bajos conducen a factores de calentamiento bajos.
- Para períodos cortos de resistencia al fuego, se puede conseguir la estabilidad sin proteger el acero.
- Para períodos largos de resistencia al fuego, la estructura de acero tiene que protegerse aplicando un aislamiento al material, mediante pantallas o por circulación de agua en caso de secciones huecas.
- La elección de la protección al incendio debe tener en cuenta la localización del elemento, aspectos estéticos y económicos.

10. BIBLIOGRAFÍA

[1] Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures. ECCS-TC-3 - Brochure No. 35, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, 1985.

[2] European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures: Calculation of the Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies exposed to the Standard Fire. ECCS TC 3, Brochure No. 30. Elsevier Scientific Publishing company, Amsterdam, 1983.

[3] Eurocode 3: “Design of Steel Structures”: ENV 1993-1-1: Part 1: General rules and rules for buildings, CEN, 1992. Part 10: Structural fire design.

[4] Eurocode 4: “Design of Composite Steel and Concrete Structures”: pr ENV 1994-1-1: Part 1.1: General rules and rules for buildings. Part 10: Structural fire design.

11. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

1. Compendium of UK Fire Test Data No. 1 - Unprotected Structural Steel, published in UK by DoE Fire Research Station and British Steel Corporation, 1988.

2. “Steel and Fire Safety - A Global Approach” - Eurofer, Brussels, Belgium: Published 1990.

3. Documentation SIA 82, “La Résistance au feu des parties de Construction Métallique” Centre Suisse de la Construction Metallique, Zurich, November 1986.

4. BS 5950: Part 8: 1990 - The Structural Use of Steelwork in Building: Code of Practice for the Fire Protection of Structural Steelwork. British Standards Institution.

ESDEP TOMO 6
PROTECCIÓN: INCENDIO

Lección 6.5: Ejemplos de Cálculo

OBJETIVOS/CONTENIDO

Se pretende familiarizar a los diseñadores con los métodos más simples de cálculo de los tiempos de resistencia ante el incendio y los espesores de aislamiento para columnas y vigas (respectivamente para el acero o las estructuras mixtas).

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Ninguno.

LECCIONES AFINES

Lección 6.1: Introducción a la Seguridad ante el Incendio

Lección 6.2: Principios de Análisis Termodinámico

Lección 6.3: Principios de Análisis Estructural

Lección 6.4: Métodos Prácticos de Lograr la Resistencia contra el Incendio

RESUMEN

Se incluyen ejemplos resueltos sobre los siguientes temas:

- Temperaturas críticas para columnas, vigas y demás elementos sometidos a cargas (ejemplos 1, 2, 3).
- Momento resistente de una viga mixta en condiciones de incendio (ejemplo 5).
- Tiempo equivalente de un incendio real (ejemplo 6).
- Protección frente a incendios de vigas de acero (ejemplo 4).

En estos ejemplos se hace uso de los principios y ecuaciones presentados en las lecciones precedentes.

EJEMPLO 1: TEMPERATURA CRÍTICA DE UN ELEMENTO CARGADO

La reducción de la resistencia con la temperatura es:

Temperatura θ	400	450	500	550	600	650
Reducción Resistencia $\psi(\theta)$	1,00	0,93	0,78	0,63	0,47	0,33

Para $\frac{P}{P_u} = \frac{\text{Carga en condiciones límites para un incendio}}{\text{Tensión resistencia bajo temperaturas normales}} = 0,5$

Puesto que el comportamiento de un elemento en tensión es equivalente al comportamiento básico del acero, se deduce que:

$$\psi(\theta) = \frac{P}{P_u} = 0,5$$

Haciendo una interpolación lineal de la tabla anterior, se obtiene la temperatura crítica $\theta_{cr} = 590°C$

EJEMPLO 2: TEMPERATURA CRÍTICA DE UNA VIGA

Se asume en este ejemplo que la viga soporta un forjado de hormigón, y por lo tanto el ala superior permanece más fría que el resto de la sección. Esta ventaja se cuantifica a través de un factor multiplicador de la carga, o factor kappa, κ, tal que:

$$\psi(\theta) = \kappa \cdot \frac{P}{P_u}$$

κ = 0,7 par una viga soportando un forjado de hormigón.

Si se usa el mismo grado de carga que el del ejemplo 1.

En este caso,

$$\frac{P}{P_u} = \frac{\text{Carga viga en estado limite incendio}}{\text{Carga equivalente para fallo en condiciones normales}}$$

Para $\frac{P}{P_u} = 0,5$

$$\psi(\theta) = 0,7 \times 0,5 = 0,35$$

Por interpolación lineal en la tabla de reducción de la resistencia del ejemplo 1, la temperatura crítica de la viga es, θ_{cr} = 645°C.

De este resultado se puede deducir que una viga soportando un forjado de hormigón tiene una temperatura crítica que supera a la de un elemento en tensión, uniformemente calentada, en 55°C par el mismo grado de carga.

EJEMPLO 3: TEMPERATURA CRÍTICA DE UNA COLUMNA

En este ejemplo se supondrá que la columna esta arriostrada para evitar su pandeo. El factor multiplicador de carga, κ, para columnas es 1,2. Este valor tiene en cuenta la influencia de las grandes deformaciones en el colapso de la columna en condiciones de incendio:

Para $\frac{P}{P_u} = 0,5$, tal como en ejemplos anteriores

$$\psi(\theta) = 1,2 \times 0,5 = 0,6$$

Por interpolación lineal en la tabla de reducción de la resistencia del ejemplo 1, la temperatura crítica de la columna es, $\theta_{cr} = 560°C$.

De este resultado se puede deducir que la temperatura crítica de una columna supera a la de un elemento en tensión, en 30°C para el mismo grado de carga.

EJEMPLO 4: PROTECCIÓN FRENTE AL INCENDIO DE VIGAS DE ACERO

Del ejemplo 2, se puede tomar la temperatura crítica de un viga, que es 645°C. De la lección 6.2, el espesor de protección requerido (en metros) es:

$$d = 0,0083 \times \lambda_i \frac{A_m}{A} \left(\frac{t}{\theta_{cr} - 140} \right)^{1,3}$$

Donde

$\frac{A_m}{A}$ es el factor área de un elemento (m^{-1})

λ_i es la conductividad térmica del material de protección (W/m°C)

t es la resistencia al incendio (mins)

θ_{cr} es la temperatura crítica de una viga (°C)

En este ejemplo, se usan los siguientes valores

$\frac{A_m}{A}$ = 200 m^{-1} (típica de vigas IPE)

λ_i = 0,15W/m°C (típica de muchos materiales de protección)

t = 60 minutos

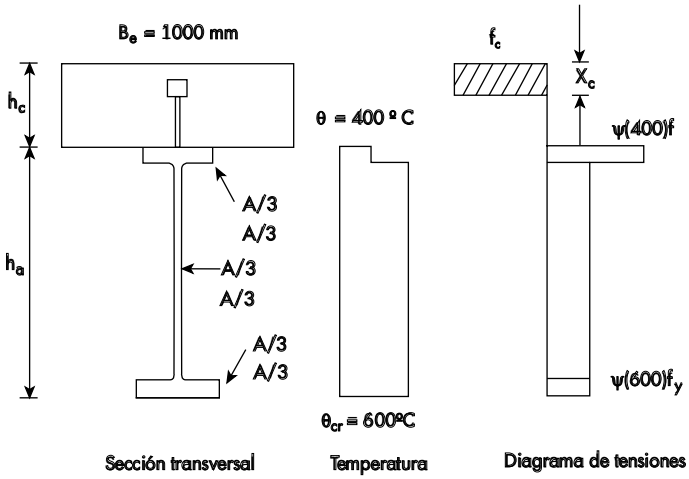
θ_{cr} = 645°C

$$d = 0,0083 \times 0,15 \times 200 \times \left(\frac{60}{645 - 140} \right)^{1,3} \times 10^3$$

= 15,6 mm (es decir, 6 mm)

EJEMPLO 5: MOMENTO RESISTENTE DE UNA VIGA MIXTA

Este ejemplo usa los principios del análisis plástico para calcular el momento de resistencia de una viga mixta sometida a un incendio. Se tomarán como conocidas las siguientes características de una viga mixta:



El área de la sección transversal de la viga es igual a la de las almas

Temperatura del ala superior = 2/3 x temperatura del alma y del ala inferior

Ancho del forjado = 1000 mm

Resistencia a compresión del hormigón f_c = 30 N/mm^2 (Nota: para cargas aplicadas durante corte tiempo en incendios γ_{mc} = 1,0)

La resistencia a tracción del acero es f_y = 235 N/mm^2

La temperatura crítica de la viga θ_{cr} = 600°C (supuesta)

La profundidad del eje neutro, x_c, en el hormigón se obtiene igualando las ecuaciones de tensión y compresión:

$$f_c\, x_c \times 10^3 = \psi(600)\left(\frac{A}{3}+\frac{A}{3}\right)f_y + \psi(400)\frac{A}{3}f_y$$

$$\left.\begin{array}{l}\psi(600) = 0,47\\ \psi(400) = 1,00\end{array}\right\}$$ tomadas del ejemplo 1

$$x_c = 0,64\,\frac{A f_y}{f_c\, B_e}$$

El momento resistente de la sección mixta se obtiene al tomar momentos en torno al eje medio de la sección en compresión del hormigón:

$$M = \psi(600)\,A\,f_y\left(\frac{h_a}{2}+h_c-\frac{x_c}{2}\right)$$

$$+\{\psi(400)-\psi(600)\}\frac{A}{3}f_y\left(h_c-\frac{x_c}{2}\right)$$

$$M = 0,47\,A\,f_y\,(0,5\,h_a + 1,44\,h_c - 0,72\,x_c)$$

$$M = 0,47\,A\,f_y\,(0,5\,h_a + 1,44\,h_c - 0,72\,x_c)$$

Con los siguientes datos:

h_a = 400 mm
h_c = 120 mm
A = 1000 mm^2

$$x_c = 0,64 \times \frac{1000 \times 235}{1000 \times 30} = 5,0\,\text{mm}$$ en condiciones de incendio

M = 0,47 x 1000 x 235 x (0,5 x 400 + 1,44 x 120 - 0,72 x 5) x 10^{-6} = 40,8 kNm

Para comparar estos valores con los valores normales, cuando ψ = 1,0, el momento de resistencia es 74,2 kNm (nota: este valor puede ser calculado usando los coeficientes de seguridad parciales para condiciones de servicio, tal y como se explica en la lección sobre vigas mixtas).

Por lo tanto $\frac{M}{M_u} = \frac{40,8}{74,2} = 0,58$ para

θ_{cr} = 600°C

Pero ψ (600) = 0,47

Si ψ (600)) $\kappa \times \frac{M}{M_u}$ se deduce que:

$k = \frac{0,47}{0,58}$ = 0,81 para vigas mixtas (comparese con el 0,7 de vigas no mixtas)

EJEMPLO 6: TEMPERATURA EQUIVALENTE DE UN INCENDIO REAL

De acuerdo con lo tratado en la lección 6.1: se asumirá que el compartimento incendiado puede ser caracterizado por los siguientes parámetros. La temperatura equivalente es:

$T_e = c\ w\ q_f$ minutos

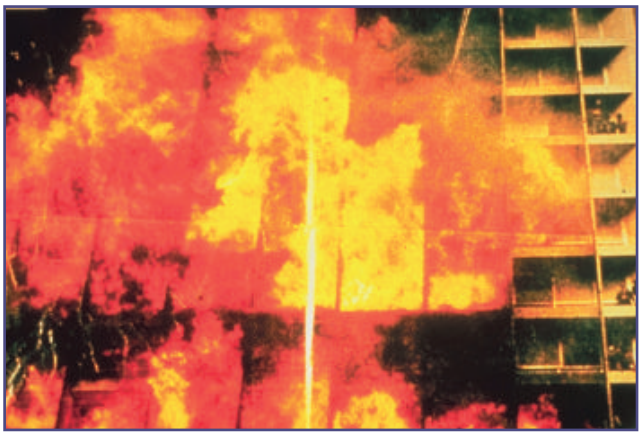
$c = 0{,}10$ para propiedades típicas en compartimentos

$w = 1{,}5$ para condiciones de ventilación normales

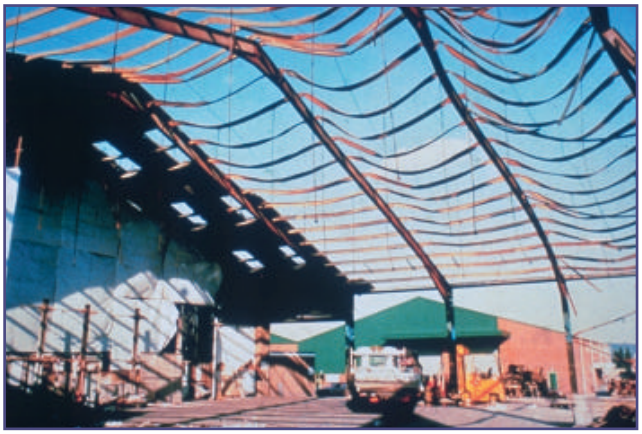
$q_f = 450$ MJ/m^2 para edificios de oficinas

$T_e = 0{,}1 \times 1{,}5 \times 450 = 67{,}5$ minutos

DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS DEL TOMO 6: PROTECCIÓN. INCENDIO



T6c1 El diseño debe cuidar la seguridad frente al incendio



T6c2 El acero sufre deformaciones a altas temperaturas que pueden colapsar la estructura



T6c4 La protección contraincendio se requiere con frecuencia para aislar la estructura



T6c5 Proyección de spray mineral en vigas de la Torre Montparnasse, Paris



T6c3 Las secciones grandes se calientan a menor velocidad que las pequeñas



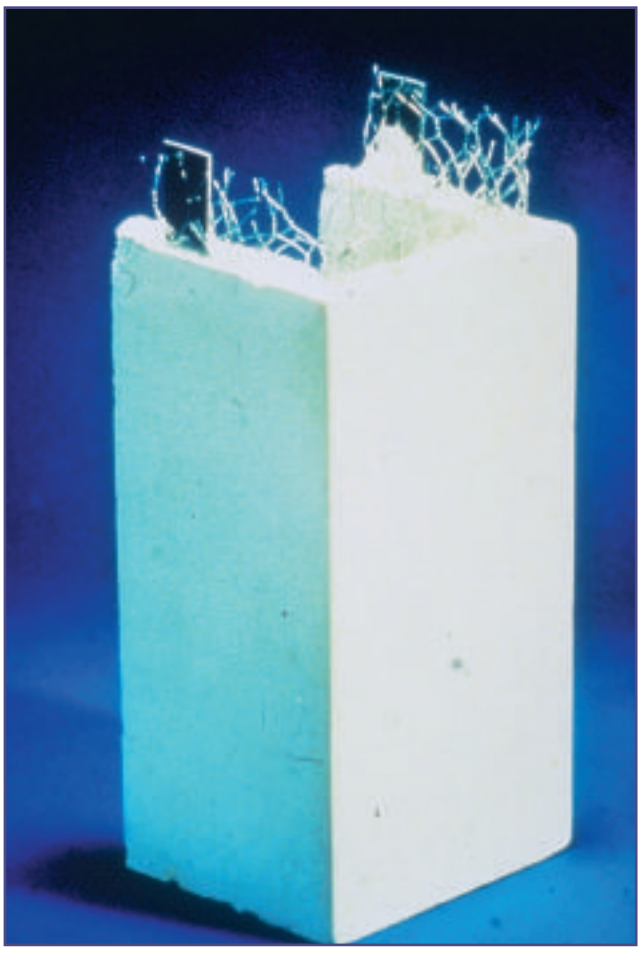
T6c6 Protección de la estructura contraincendio mediante paneles ligeros



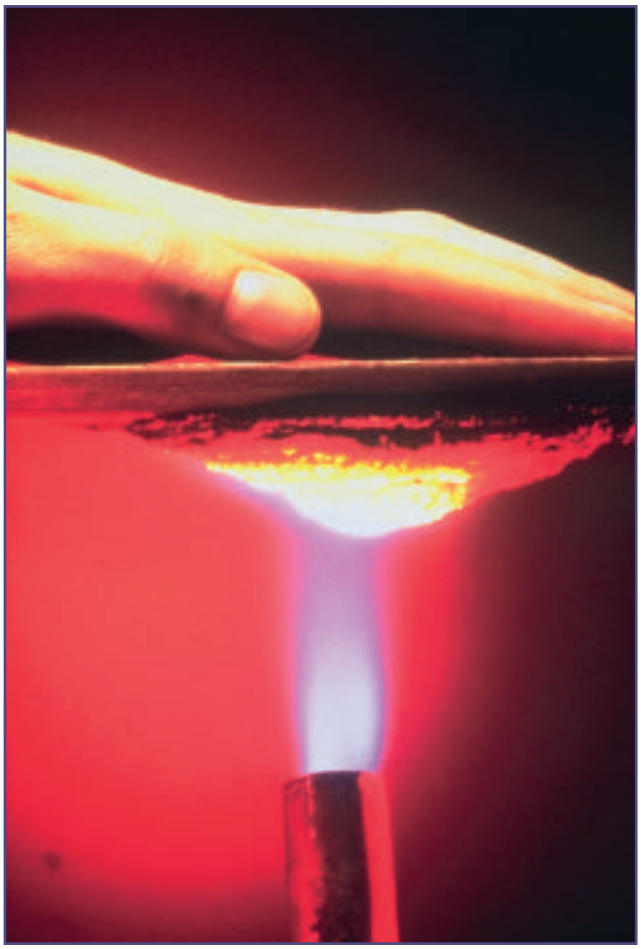
T6c7 La lana de vidrio es un buen aislamiento contraincendio



T6c8 Las pinturas intumescentes favorecen la estética de las estructuras metálicas



T6c10 Los encamisados prefabricados son más caros que la protección con paneles



T6c9 Las pinturas intumescentes expanden con la temperatura, aislando el material y proporcionando protección contraincendio



T6c11 Algunos tipos de edificios no exigen protección contraincendio, como los aparcamientos, donde se han realizado ensayos que demuestran que en caso de incendio las temperaturas que se alcanzan no son críticas



T6c12 El uso de rociadores no sólo protegen el contenido de los edificios, sino que minimizan la necesidad de protección contraincendio



T6c13 Daños producidos por el incendio en Broadgate, Londres, Reino Unido. El incendio duró 4,5 horas. La estructura de forjados mixtos no colapsó



T6c14 Daños producidos por el incendio en Broadgate, Londres, Reino Unido



T6c15 Se ha demostrado que los elementos protegidos por el cerramiento mantienen temperaturas suficientemente bajas como para no precisar protección contraincendio