

7^a PARTE :

Análisis de la resistencia al fuego

Todos los derechos reservados, queda completamente prohibido la reproducción total o parcial de este documento, sin conocimiento previo escrito de Buildsoft.

Los programas descritos en este manual están bajo el copyright de BuildSoft. Sólo pueden ser usados por parte del licenciado y sólo pueden ser copiados con el objetivo de crear una copia de seguridad. Está prohibida por la ley la copia de los programas para objetivos distintos del uso del licenciado propio.

Aunque BuildSoft haya comprobado los programas descritos en este manual y ha revisado este manual, se los ofrecen sin ningún tipo de garantía en cuanto a su calidad, su funcionamiento, su capacidad de comercio o adecuación para un uso particular. El riesgo, tanto en los resultados y el funcionamiento de los programas, como la información en este manual, corre a cuenta del usuario final.

1 Índice

1	ÍNDICE.....	3
2	ANÁLISIS DE RESISTENCIA AL FUEGO	5
2.1	INTRODUCCIÓN.....	5
2.2	CARGAS TÉRMICAS	5
2.2.1	<i>Curvas de fuego nominales.....</i>	<i>7</i>
2.2.2	<i>Curvas de fuego paramétricas</i>	<i>9</i>
2.3	LAS ACCIONES EN EL CASO DE FUEGO	10
2.4	RESPUESTA TÉRMICA	11
2.4.1	<i>El transporte de calor en hormigón.....</i>	<i>12</i>
2.4.2	<i>El transporte de calor en acero.</i>	<i>13</i>
2.4.2.1	Flujo de calor neto h_{net}	14
2.4.2.2	Factor de forma A_m/V	16
2.4.2.3	Calor específico c_a de acero	17
2.4.2.4	Coefficiente de sombra k_{sh}	18
2.5	RESPUESTA MECÁNICA	19
2.5.1	<i>Reducción del límite elastico y módulo de Young para elementos de acero</i>	<i>20</i>
2.5.2	<i>Resistencia de compresión reducida para el hormigón.</i>	<i>21</i>
2.5.3	<i>Dilatación térmica de acero y hormigón.</i>	<i>22</i>
2.6	MÉTODO DE CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE FUEGO.....	22
3	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL FUEGO CON POWERFRAME	
	28	
3.1	INTRODUCCIÓN.....	28
3.2	DEFINICIÓN DE LAS CARGAS DE FUEGO EN LA VENTANA DE ‘CARGAS’... ..	31
3.2.1	<i>Definir un grupo de cargas para un análisis de fuego.....</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Definir una curva de fuego</i>	<i>32</i>
3.2.3	<i>Generar las combinaciones de fuego.....</i>	<i>36</i>
3.3	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FUEGO	36
3.4	LA SECCIÓN DESPUÉS DEL FUEGO	38
4	EJEMPLOS.....	40
4.1	SECCIÓN HEA DESPROTEGIDA	41
4.1.1	<i>Expuesta al fuego por todos lados</i>	<i>41</i>
4.1.2	<i>Expuesto a fuego por sólo 3 lados.</i>	<i>43</i>
4.2	HEA PERFILES PROTEGIDOS	44
4.3	SECCIÓN RECTANGULAR EN HORMIGÓN ARMADO.	47
4.4	SECCIÓN-T DE HORMIGÓN ARMADO.	52

4.5	UNA LOSA SOBRE UNA VIGA R30/40	56
-----	--------------------------------------	----

2 Análisis de Resistencia al Fuego

2.1 Introducción

El análisis de la resistencia de fuego en estructuras de edificación no es en absoluto una tarea fácil y generalmente aporta un esfuerzo adicional a los ingenieros competentes y experimentados. Mientras que antiguamente se hacía uso de recursos limitados, como normas de diseño simplificadas y aproximativas, ahora Powerframe le permite al ingeniero optar por un análisis más detallado y poder evaluar los esfuerzos globales a tener en cuenta bajo el efecto desastroso de un incendio.

Durante las últimas décadas, se han realizado extensas investigaciones para examinar las consecuencias de un incendio sobre las estructuras. Gracias a estas investigaciones, se han podido desarrollar unas técnicas más avanzadas para el análisis estructural, que han sido documentadas en numerosos informes de investigación y que han descrito en las nuevas normativas. Estas técnicas avanzadas han demostrado ser indispensables para la definición de los niveles de seguridad ante el fuego de estructuras y componentes de edificación con niveles de fiabilidad adecuados.

La resistencia de fuego de estructuras de edificación se puede obtener de manera experimental o de manera numérica. La aproximación numérica de este problema se describe **las partes 1-2 “Structural Fire Design”** de los Eurocódigos.

Mientras que EN 1991-1-2 presenta las cargas de fuego y las combinaciones de cargas accidentales relacionadas, las otras partes 1-2 se dirigen a las normas de análisis relativos a los materiales específicos de construcción.

2.2 Cargas térmicas

Para poder calcular la respuesta térmica debido a un incendio, es imprescindible conocer las cargas de fuego. Para describir este tipo de

cargas, en el EN 1991-1-2 se definen una serie de modelos de fuego diferentes. El desarrollo de este tipo de modelos es una tarea compleja, y dependen de muchos parámetros a considerar. Los modelos de fuego más complejos serán también más complejos de analizar, pero así se parecerán más a la situación fuego real. La siguiente tabla ofrece un resumen de los diferentes tipos de modelos de fuego posibles:

Modelo de fuego nominal	Fuego estándar *
	Fuego externo *
	Fuego hidrocarburo *
Modelo de fuego básicos	Fuego local
	Fuego paramétrico
Modelo de fuego avanzados	Modelo de 1 zona
	Modelo de 2 zonas
	Modelo de combinación de la zona 1 y 2
	Modelo de simulación.

* Los modelos de fuego implementados en los programas de BuildSoft

Los modelos de fuego nominales y los paramétricos, se describen por medio de una curva de temperatura-tiempo describiendo la relación de la temperatura del ambiente en función de tiempo. Estos modelos de fuego describen el peligro de un incendio completamente desarrollado y suponen una temperatura uniforme en cada instante dentro del compartimiento entero.

Mientras que la aplicación de las curvas de fuego nominales sólo requiere un conocimiento limitado de la conducta del fuego dentro del compartimiento, el cálculo de las temperaturas de los modelos básicos y avanzados también dependerán de:

- Carga de fuego & la capacidad calorífica de todos los materiales inflamables, expresados en MJ/m² superficie del suelo;

- Condiciones de ventilación;
- Las dimensiones y la composición del muro (incluyendo las posibles aberturas) del compartimiento.

Estos modelos de fuego consideran “el ciclo de vida” de un peligro de fuego, incluyendo la fase de decrecimiento.

2.2.1 Curvas de fuego nominales

Todos los métodos basados en el uso de la curva de fuego nominal requieren, gracias a las hipótesis simplificadas, sólo un conocimiento limitado de la conducta del peligro de incendio dentro del compartimiento. Se debería saber que del uso de estos métodos, resultarán unos diseños relativamente conservadores al usar reglas más estrictas (por ejemplo, en el caso de que la resistencia al fuego calculada deba ser de 60 o 120 minutos)

Los Eurocódigos distinguen tres curvas de fuego nominales:

- Curva estándar (o curva ISO 834.)

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

Este modelo se debería usar cuando no haya información extra disponible sobre el fuego. El fuego estándar tiene las siguientes características:

- se supone que el fuego tiene lugar en el compartimiento entero, independientemente del tamaño real del compartimiento;
- el fuego nunca decrece, ni siquiera cuando todos los materiales inflamables están agotados;
- no tiene en cuenta la fase de antes del incendio;
- no depende de la carga del fuego, ni de las condiciones de ventilación.

A pesar de esta aproximación tan conservadora, éste es un modelo que se usa muy a menudo, gracias a su facilidad de uso.

- Curva del fuego externo

$$\theta_g = 20 + 660 \left(1 - 0.686e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t} \right)$$

Este modelo sirve para la fachada externa del muro de separación que está expuesto al humo proveniente del fuego interior. Este tipo de fuego se caracteriza por temperaturas más bajas y por eso no puede usarse para elementos estructurales que se encuentran al exterior del compartimiento, que puedan ser expuestos a temperaturas altas (por ejemplo, a través de aberturas) En este caso, se debería usar otro modelo.

- Fuego hidrocarburo

$$\theta_g = 20 + 1080 \left(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t} \right)$$

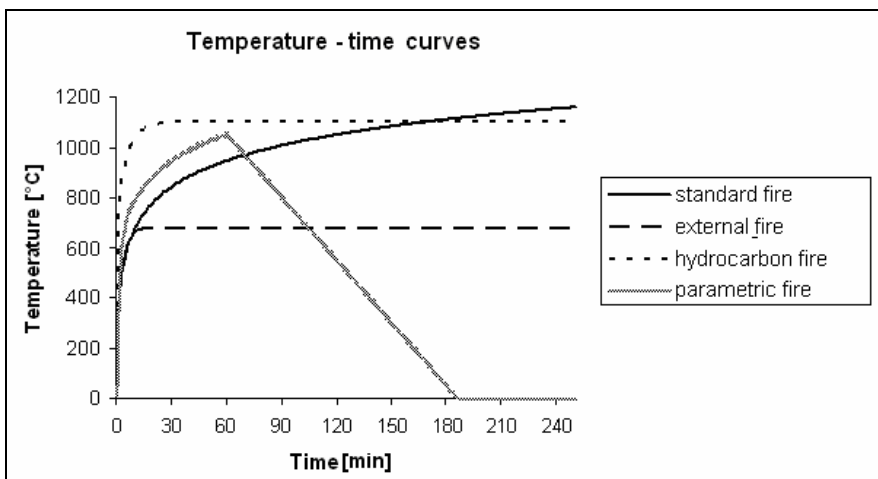
Este modelo se puede usar para los incendios causados por la ignición de hidrocarburos (combustibles, diesel...) y se caracteriza por temperaturas muy altas.

En las ecuaciones mencionadas se han usado los siguientes parámetros:

θ_g : la temperatura del ambiente (gas) dentro del compartimiento o cerca del muro de separación, en grados Celsius °C;

t: tiempo, en minutos.

Las curvas nominales de temperatura-tiempo se representan en forma de gráfico en la siguiente figura:



Se puede observar que tanto la curva de fuego externo como la curva del fuego por hidrocarburo, alcanzan su máximo muy rápido, respectivamente de 680°C o 1100°C. En comparación con la curva de fuego de hidrocarburo podemos apreciar que la curva del fuego estándar sigue aumentando siempre, y a partir de 180 minutos, alcanza temperaturas mayores que las de la curva de hidrocarburo.

2.2.2 Curvas de fuego paramétricas

Los fuegos paramétricos también se describen con una curva de temperatura-tiempo. No obstante, estas curvas dependen de un número considerable de parámetros ambientales y por lo tanto ofrece una aproximación más realista de cómo evoluciona el fuego. Una curva de fuego paramétrico tiene en cuenta las condiciones de ventilación del compartimiento y las propiedades térmicas de los muros. Además, las curvas de fuego paramétricas tienen en cuenta la fase de disminución del fuego, permitiendo así una disminución de temperatura cuando la carga del fuego se ha agotado. Visto que la distribución de la temperatura en el compartimiento se supone uniforme, estos modelos deberían usarse sólo para los compartimentos con un tamaño moderado.

Para más información acerca de la creación de las curvas de fuego paramétricas, consultar el anexo A (informativo) de EN1991-1-2.

2.3 Las acciones en el caso de fuego

Las acciones que se deben considerar en situación de incendio en edificios, se obtienen combinando las diferentes acciones mecánicas y térmicas (considerando los esfuerzos generados por el fuego), usando los coeficientes de seguridad y coeficientes de combinación.

Según EC-0, se debería considerar un fuego como una acción accidental, lo que quiere decir que sólo se tienen que considerar los estados límites últimos

Las combinaciones accidentales se describen de la siguiente manera:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + (\psi_{1,1} \text{ o } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

En las que

... k : valores característicos

G : cargas permanentes

Q_1 : la carga variable dominante

Q_i : las cargas variables concomitantes.

ψ_1 : el factor de combinación valor frecuente de las cargas variables

ψ_2 : el factor de combinación para valor casi permanente de las cargas variables.

A todos los factores de seguridad parciales se asigna el valor 1. La elección entre $\psi_{1,1} Q_{k,1}$ o $\psi_{2,1} Q_{k,1}$ es un parámetro determinado nacionalmente y tendrá que usarse en función de la situación de diseño accidental relevante. El Eurocódigo prefiere la aplicación del valor casi permanente ψ_2 para todas las cargas variables. En algunos países (por ejemplo, en Bélgica) se usa el factor de combinación frecuente ψ_1 para las cargas variables dominantes.

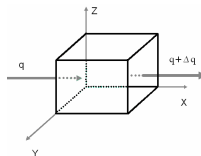
2.4 Respuesta térmica

Con el aumento de la temperatura de los gases θ_g , la estructura del edificio también aumentará. Por supuesto, existirá un retraso entre las variaciones de temperatura en la estructura y la de los gases. Dado que las secciones de acero disponen de una gran conductividad térmica y a que poseen paredes relativamente delgadas, hace que este tipo de sección se caliente de manera bastante uniforme. Al contrario, las secciones de hormigón tienden a ser más masivas y por lo tanto, el calentamiento no será uniforme en la sección.

Para la descripción del transporte de calor en los materiales, recurrimos en las leyes de la termodinámica. Dependiendo del material usado, se pueden introducir más simplificaciones o suposiciones.

En general, se puede describir el transporte de calor, dentro de un elemento de construcción, con la ecuación diferencial de Fourier:

$$\frac{\partial(\rho c \theta)}{\partial t} + \frac{\partial \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}}{\partial x} = 0 \quad (\text{según la dirección X})$$



en la que

θ	temperatura en el punto x [°C]
ρ	densidad de masa [kg/m³]
c	calor específico [J/kgK]
λ	coeficiente de conductividad térmica en [W/mK]

De la ecuación anterior, se puede ver fácilmente que la variación de temperatura en un elemento expuesto a fuego viene afectada mayoritariamente por las siguientes propiedades:

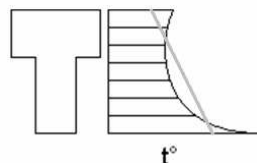
- Conductividad térmica λ
- Calor específico c

Se suele combinar el calor específico “c” con la densidad de masa “p”, a la que se suele referir como la capacidad calorífica $\rho.c$. Tanto la capacidad calorífica como la conductividad térmica dependen fuertemente de la temperatura en los materiales más usuales de construcción.

2.4.1 El transporte de calor en hormigón

Dado el hecho de que las secciones de hormigón suelen ser muy masivas y que el hormigón como material tiene una conductividad térmica bastante baja, la variación de la temperatura dentro de la misma sección de hormigón no es uniforme. Por lo tanto, es de suma importancia tener acceso a un programa de cálculo, que partiendo de la ecuación diferencial general de Fourier, permita calcular la temperatura en cada punto de la sección. Se requiere de un conocimiento profundo y gran experiencia con la termodinámica. BuildSoft colaboró con Physibel, que son especialistas en termodinámica, para desarrollar juntos un software de análisis de resistencia al fuego para estructuras.

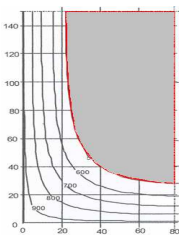
Una vez conocida la distribución de la temperatura, se calcula un incremento de temperatura uniforme y un gradiente de temperatura (lineal) según ambos ejes de inercia principales. El incremento de temperatura uniforme y los gradientes de temperatura causarán deformaciones adicionales en el caso de que las deformaciones no estén restringidas externamente, o causarán esfuerzos y tensiones internas en el caso contrario. En el caso de temperaturas muy altas, los gradientes de temperatura pueden ser motivo de momentos internos enormes.



Las propiedades térmicas de los materiales de hormigón, se calculan en base al incremento medio de la temperatura:

- el calor específico c_c aumenta ligeramente con el aumento de las temperaturas, pero se puede decir que tiene un valor más o menos constante de 1000 J/kgK.
- la conductividad térmica λ_c disminuye con el aumento de la temperatura, pero se puede decir que tiene un valor igual a 1,60 W/mK (granulación silícea), 1,30 W/mK (granulación calcárea) o 0,80 W/mK (granulación ligera).

Además, mencionamos que en el caso de que la temperatura del hormigón exceda los 500°C, se considera que no aporta resistencia a la sección. Esta hipótesis, se justifica por el hecho de que con temperaturas



tan altas es posible que el hormigón explote de repente, y por lo tanto, se reduzca la sección efectiva disponible durante el incendio. Además se usará esta sección de hormigón reducida para el cálculo de las armaduras. Con estas hipótesis, se supone que la parte de hormigón que no exceda de 500°C mantiene su resistencia original (a la temperatura ambiente).

2.4.2 El transporte de calor en acero.

Dado el hecho de que la conductividad térmica del acero es mayor que la del hormigón, la distribución de temperatura en un elemento de acero será más regular que en el interior de una sección de hormigón. Por lo tanto, se supone que la temperatura está uniformemente distribuida en la sección de acero.

Ya que se supone una temperatura constante en la sección entera, las deformaciones restringidas se limitarán a deformaciones longitudinales y además se pueden usar fórmulas analíticas para la determinación de la temperatura del acero.

Efectivamente, para las secciones de acero protegidas y no protegidas, las ecuaciones son :

$$\Delta\theta_a = k_{sh} \frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t \quad (1)$$

y

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_g - \theta_a) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_g \quad (2)$$

Las ecuaciones diferenciales anteriores describen el aumento de la temperatura en un elemento de acero durante un intervalo de tiempo Δt y puede solucionarlo numéricamente si las condiciones iniciales y las condiciones de contorno son conocidas. En ambos casos se supone que la temperatura ambiental es 20°C.

Ecuación (2) tiene en cuenta el almacenamiento de calor en el recubrimiento de protección y presupone que la temperatura en la

superficie exterior de la capa de protección equivale a la temperatura del gas.

Ahora entramos más en detalle sobre el significado de los términos que aparecen en la ecuación anterior.

2.4.2.1 Flujo de calor neto $\dot{h}_{\text{net}}$

El flujo de calor neto $\dot{h}_{\text{net}}$ depende del modelo de fuego seleccionado y de las propiedades térmicas de la capa de protección.

a) Flujo de calor neto para secciones de acero no protegidas.

El flujo de calor neto de acero no protegido se determina por:

- Radiación: $\dot{h}_{\text{net},r} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \Phi \cdot \varepsilon_{\text{res}} \cdot ((\theta_r + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4)$
- Convección: $\dot{h}_{\text{net},c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a)$

en las que:

Φ	factor de forma
ε_{res}	coeficiente de emisión residual
α_c	coeficiente de convección
θ_a	temperatura de acero
θ_r	temperatura efectiva de radiación
θ_g	temperatura del gas

Algunas explicaciones adicionales:

- El factor de forma Φ es un factor geométrico ≤ 1 ; en la mayoría de los casos prácticos, este factor es considerado igual a 1.
- El coeficiente de emisión residual ε_{res} es el producto del coeficiente de emisión de acero ($\varepsilon_m = 0.7$) y del ambiente ($\varepsilon_f = 1$).

- La temperatura de radiación θ_r se podría considerar igual a la temperatura ambiental del gas θ_g durante el fuego. Esta temperatura proviene de la curva de fuego usado para el análisis.
- El valor de la temperatura de acero θ_a es igual a la temperatura calculada en el punto anterior.
- El coeficiente de convección α_c varia en la práctica entre 25 (fuego estándar y fuego externo) y 50 W/m²K (fuego hidrocarburo). Para circunstancias de fuego naturales se puede suponer que, $\alpha_c = 35 \text{ W / m}^2 \text{ K}$.

b) Flujo de calor neto para secciones de acero protegido.

Durante el cálculo de temperaturas para secciones de acero protegido, se debe tener en cuenta el efecto de los materiales refractarios de protección. Es decir, el flujo de calor neto total $\dot{h}_{net}$ para secciones de acero protegido también depende del espesor de la capa de protección (d_p) y de las propiedades térmicas del material refractario (λ_p , ρ_p , c_p).

Estas propiedades se incluyen en la ecuación diferencial (2) por medio del factor ϕ .

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

ϕ : factor de participación de la capa de protección.

En el caso de que la capacidad térmica de la capa de protección sea tan baja en comparación con la capacidad térmica de acero ($\phi \approx 0$), se puede calcular el flujo de calor neto aproximadamente como sigue:

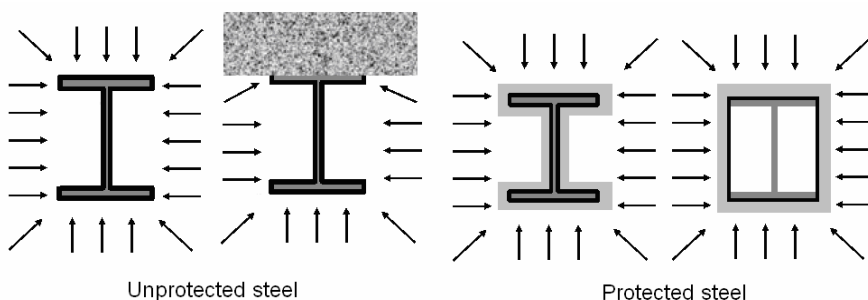
$$\dot{h}_{net} \approx \lambda_p / d_p \cdot (\theta_g - \theta_m)$$

Es decir que aproximadamente se puede usar la ecuación. (1) también para las secciones de acero protegido.

2.4.2.2 Factor de forma A_m/V

El factor de forma del perfil A_m/V [m^{-1}] refleja los aspectos geométricos de la sección de acero y la manera en la que está expuesta al fuego. El factor de forma se define como el cociente entre las superficie perimetral del perfil expuesta al fuego (por dónde se inyecta el calor) y el área de la sección. Las secciones con un factor de forma grande tienen poca masa y se calentarán más rápido. En este caso se justifica la distribución de temperaturas uniforme. Las secciones de acero con un factor de forma pequeño, tienen una masa mayor y una inercia térmica más grande. En este último caso, las variaciones de temperatura en la propia sección no se pueden despreciar

El concepto del factor de forma, se ilustra en las siguientes figuras.



Algunas notas con respecto a estas figuras:

- Para los elementos de acero debajo de una losa de hormigón, no se considera la transferencia de calor entre el acero y el hormigón.
- Para perfiles con una caja de protección, la superficie de acero se toma igual a la superficie interior de la capa de protección cuadrada.

Se refiere al factor de forma de los elementos de acero protegido con A_p/V . Las fórmulas para A_p/V están en la Tabla 4.3 de EN 1993-1-2.

Finalmente, mencionamos que el factor de forma se incluye, tanto de acero protegido como no protegido, en los catálogos de productos.

2.4.2.3 Calor específico c_a de acero

El calor específico de acero c_a [J/kgK] se determina como sigue:

- para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$$

- para $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

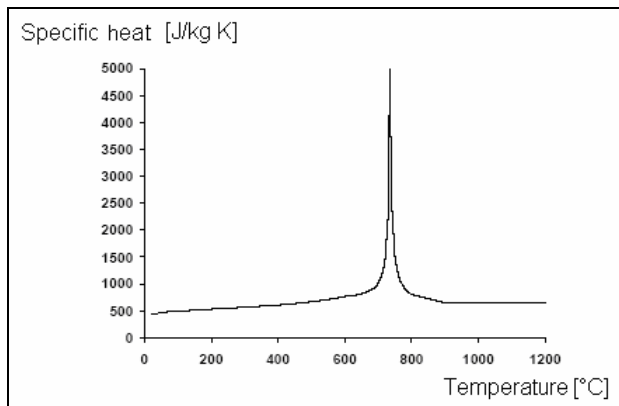
- para $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

- para $900^\circ\text{C} \leq \theta_a$

$$c_a = 650$$

El siguiente gráfico muestra la variación del calor específico en función de la temperatura:



De este gráfico se puede desprender que el calor específico depende en gran medida de la temperatura del acero. Alcanza un punto máximo de 5000 J/kg K con un temperatura de 735°C.

2.4.2.4 Coeficiente de sombra k_{sh}

El coeficiente de sombra k_{sh} es un factor de reducción que se puede usar en el cálculo de las temperaturas de secciones de acero no protegido expuestas a un fuego estándar.

El efecto de sombra es causado por el hecho de que partes de la sección están localmente tapadas de la fuente de calor, como consecuencia de la forma del perfil de acero. Además tiene importancia en los perfiles de sección abierta (por ejemplo los perfiles I). En cuanto a los perfiles de sección cerrada (p. ej perfiles tubulares) este efecto no aparecerá.

Se puede mostrar que para los perfiles I, se puede calcular el efecto de sombra con la siguiente fórmula:

$$k_{sh} = 0.9[A_m / V]_{caja} / [A_m / V]$$

En todas los demás casos se puede usar la siguiente fórmula para calcular el valor de k_{sh} :

$$k_{sh} = [A_m / V]_{caja} / [A_m / V]$$

$[A_m / V]_{caja}$ es el valor de contorno de la masividad y se define como la proporción entre el circunferencia imaginaria del perfil de acero y su superficie.



Para elementos de acero protegido, el coeficiente de sombra no tiene mucha importancia y por lo tanto podemos decir que equivale a 1

2.5 Respuesta mecánica

La “respuesta mecánica” de una estructura de edificación expuesta a un fuego, se entiende cómo el conjunto de acciones mecánicas que sufre el edificio durante la duración entera del fuego.

Efectivamente, el incremento de la temperatura comporta lo siguiente:

- La construcción se dilatará. No obstante, sólo en algunos casos lleva a una dilatación uniforme de la estructura.
- La resistencia y la rigidez de los materiales de construcción se deterioran, lo que llevará a deformaciones adicionales.
- La resistencia y la rigidez se deterioran de tal forma, que la estructura puede no ser capaz de soportar las cargas de diseño.

Aparte de la realización de ensayos de resistencia al fuego destructivos y caros, para determinar la respuesta mecánica de una estructura o parte de una estructura, va siendo más corriente estudiar las características de la respuesta mecánica usando técnicas de cálculo.

Para las estructuras de acero en particular, se pueden distinguir 3 métodos de diseño:

- se considera por separado cada elemento estructural individual de la estructura entera, respetando las condiciones de contorno para los elementos individuales;
- parte de la estructura entera se puede investigar: simulando la interacción con el resto de la estructura mediante apropiadas condiciones de contorno apropiadas para la parte investigada.
- se considera la estructura entera.

Está claro que el último método de diseño llevará a una representación más realista de la respuesta mecánica de la estructura expuesta a fuego. Efectivamente, la transferencia de cargas entre los elementos expuestos directamente al fuego y los elementos que no están expuestos a fuego, se puede modelar detalladamente sin asumir simplificaciones.

Además, el Eurocódigo propone 3 técnicas para calcular la respuesta mecánica:

- mediante el uso de **las tablas**: esta opción sólo se puede aplicar a estructuras mixtas de acero y hormigón;

- usando **los modelos de análisis simplificados**, incluido entre otros el método de “Temperatura crítica”;
- usando **los modelos de análisis avanzados**, que son modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos o el método de las diferencias finitas.

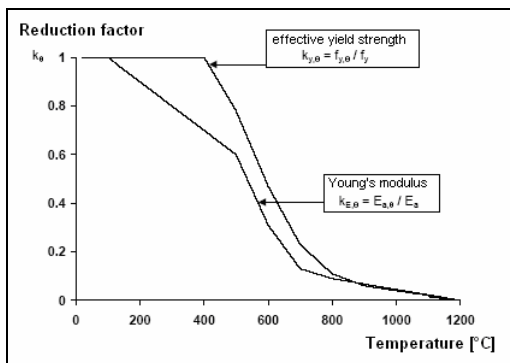
El último método mencionado, se puede aplicar a todos los tipos de estructuras de edificación y se usa cada día mas como parte de la moderna Ingeniería de Seguridad al Fuego (Fire Safety Engineering approach).

En el capítulo siguiente de este manual, se puede encontrar Información más extensa sobre el método de cálculo usado por PowerFrame. A continuación discutimos brevemente la influencia del incremento de temperatura en las propiedades mecánicas del acero y el hormigón.

2.5.1 Reducción del límite elastico y módulo de Young para elementos de acero

Como ya hemos mencionado, las propiedades mecánicas se deteriorarán con un incremento de temperatura. Sobre todo el límite elástico y el módulo de elasticidad del acero mostrarán un descenso notable cuando la temperatura aumente.

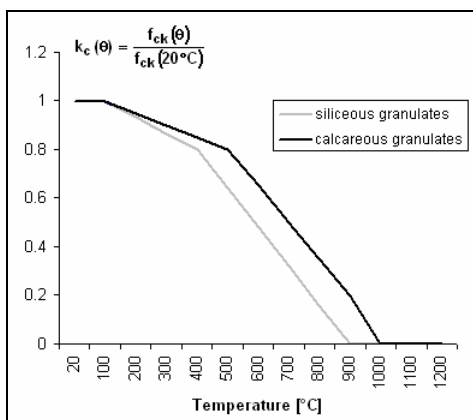
Esta relación se puede describir analíticamente y se representa gráficamente en las siguientes figuras. Los factores $k_{y,\theta}$ y $k_{E,\theta}$ son dos factores de reducción que representan el ratio entre la tensión de fluencia a temperatura θ / tensión de fluencia a t° ambiente y el módulo elástico a temperatura θ / módulo elástico a la temperatura ambiente.



Podemos ver que el acero sólo empieza a perder su resistencia y rigidez al alcanzar temperaturas entre los 400°C. y los 600 °C, la rigidez disminuye hasta 31% del valor original, mientras que la resistencia disminuye hasta aproximadamente el 47%.

2.5.2 Resistencia de compresión reducida para el hormigón.

El comportamiento de la resistencia característica de compresión f_{ck} en función de la temperatura aparece en el siguiente gráfico.

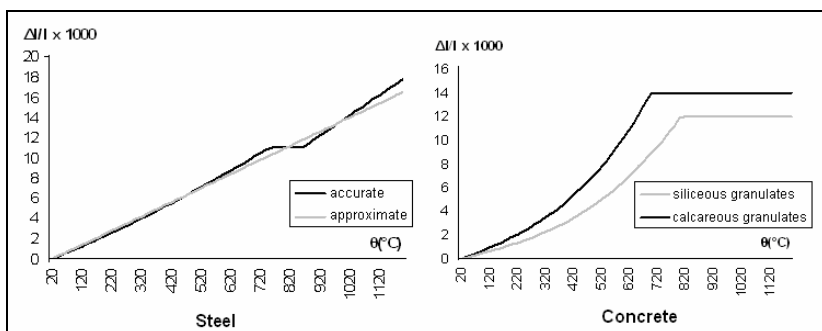


El descenso menos rápido de la resistencia a compresión para un hormigón calcáreo, se debe a que éste posee una conductividad térmica más baja de sus gránulos.

Nótese que la resistencia de estos tipos de hormigón se reduce hasta 50% con una temperatura de 600°C. No obstante, pocas veces ocurre que la temperatura de hormigón alcance estos niveles.

2.5.3 Dilatación térmica de acero y hormigón.

Los modelos de análisis más avanzados requieren, aparte de conocer las propiedades mecánicas, conocer también las propiedades de la dilatación térmica. Los coeficientes de la dilatación térmica del acero y hormigón se presentan en los siguientes gráficos. Para los datos numéricos, consultar la EN1992-1-2 y EN1993-1-2.



Para el acero al carbono, el coeficiente de dilatación térmica, se puede considerar constante y lineal para todo el rango de temperaturas. Para hormigón, inicialmente el coeficiente de expansión térmica se incrementa con la temperatura, después permanece más o menos constante para altas temperaturas.

2.6 Método de cálculo de la resistencia de fuego.

El primer paso que tenemos que hacer al realizar un análisis de la resistencia de fuego con PowerFrame, consiste en la selección o

definición de una curva de fuego. El usuario puede usar una de las tres curvas de fuego nominales predefinidas (fuego estándar, fuego externo, fuego de hidrocarburo), o puede crear una curva de temperatura – tiempo personalizada (fuego paramétrico). Se debe especificar la resistencia al fuego requerida, en otras palabras, definir el tiempo en que la construcción tiene que seguir siendo resistente durante el incendio.

Partiendo de estos datos, se puede determinar la variación de temperatura en el compartimiento de fuego durante el tiempo anteriormente impuesto. Se pueden conocer así las **cargas térmicas**.

Con el aumento de la temperatura del gas, la temperatura de la estructura también crecerá, aunque con un cierto retraso. El siguiente paso, consistirá en calcular la temperatura en los elementos de la estructura durante el periodo en que están expuestos al fuego. En otras palabras, el cálculo de la **respuesta térmica de la estructura**.

Dependiendo del tipo de material, se pueden hacer ciertas simplificaciones. En cuanto al acero, se asume un pequeño error, ya que se considera la temperatura uniforme en la sección entera. Esto permite convertir la ecuación diferencial general en ecuaciones de diferencias finitas relativamente sencillas. Con estas ecuaciones, se puede calcular la temperatura en el material paso por paso partiendo de una temperatura inicial de 20°C.

Para elementos estructurales de hormigón, se requiere de unas aproximaciones diferentes. Las secciones transversales de hormigón suelen ser más masivas y tienen una inercia térmica bastante mayor, éste hecho implica que existan variaciones de temperatura en la propia sección. Aparte del incremento global de la temperatura en la sección, la variación de temperatura también causará un gradiente (lineal) de temperatura según ambos ejes de inercia principales.

El incremento de temperatura y los gradientes se pueden aplicar como carga térmica en los elementos constructivos expuestos a la fuente de calor. Esta carga accidental de fuego, se combina con otras cargas mecánicas para definir combinaciones de carga de diseño.

Atención, para la comprobación elemento a elemento propuesta por la norma, el aumento uniforme de temperatura y los efectos debidos al gradiente de temperatura no se consideran en el análisis global alástico de la estructura de acero u hormigón. No obstante, PowerFrame sí le

permite considerar el incremento de la temperatura y los gradientes. Se recomienda que considere sólo parcialmente los efectos de los incrementos de temperatura y del gradiente, si no, las fuerzas internas alcanzan niveles muy altos. Las normas no ofrecen ninguna indicación con respecto a la medida en que se tienen que tener en cuenta los incrementos de temperatura y los gradientes. Esta elección requiere alguna experiencia y la responsabilidad del usuario.

Ahora trataremos de examinar la **respuesta mecánica de la estructura** a los susodichos cambios de temperatura:

- Algunas propiedades de los materiales como el módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación térmico, se modifican cuando la temperatura aumenta. Se tiene que tener en cuenta estas reducciones en las características del material al hacer el análisis global elástico para las combinaciones de carga accidentales de fuego. Sin embargo, si hace uso del método simplificado, se pueden calcular todas las combinaciones a la temperatura ambiente. No obstante, Powerframe permite que tenga esto en cuenta para que pueda evaluar la influencia del módulo E reducido y del coeficiente de dilatación térmica en el cálculo de esfuerzos y deformaciones de la estructura.
- Como resultado de las deformaciones impedidas, se generan fuerzas internas y tensiones dentro de los elementos de la estructura. En el caso del acero, las deformaciones impedidas se limitan a las deformaciones longitudinales y para las estructuras de hormigón, el incremento de temperatura y los gradientes se manifiestan en deformaciones longitudinales y curvaturas. Atención, estas fuerzas sólo se manifestarán cuando se incluye la carga térmica en las combinaciones de fuego. Por defecto, no encontrará ninguna fuerza para el grupo de cargas 'fuego'.

Después de haber realizado el análisis global elástico, las fuerzas internas en el hormigón y en el acero, sirven para la realización de un cálculo de la armadura necesaria o para una comprobación de las secciones respectivamente.

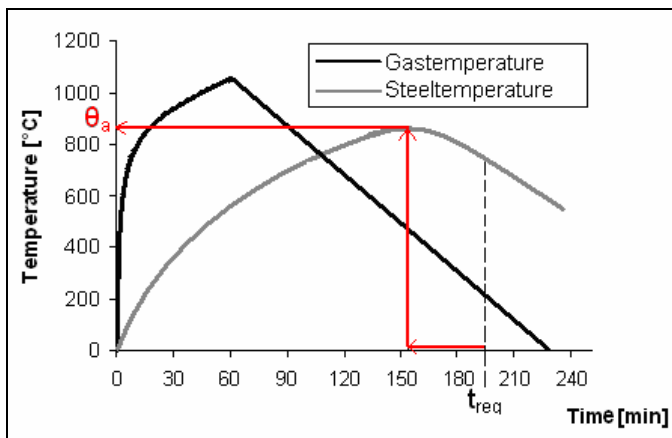
Las verificaciones de resistencia y pandeo, se realizarán conforme a la EN 1993-1-2 (par 4.2) y será completamente análogo a una verificación a temperatura ambiente. Hay que tener en cuenta que el límite elástico

depende fuertemente de la temperatura, por lo tanto, las altas temperaturas influirán sensiblemente en los resultados.

La armadura en una sección de hormigón, se calculan considerando la sección de hormigón reducida y la calidad del acero deteriorado. Las otras propiedades siguen siendo las mismas como las del hormigón a 20°C. Para ambos materiales, el coeficiente de seguridad para el material equivale a 1.

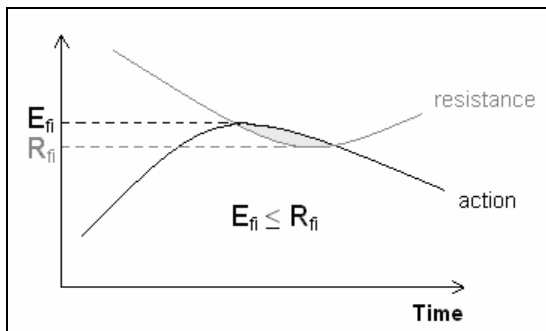
Nota: La temperatura de diseño para un material en particular no es necesariamente igual a la temperatura en el instante correspondiente al tiempo de resistencia al fuego requerido. En realidad, en el caso de un fuego paramétrico, la temperatura del entorno puede haber disminuido significativamente en aquel instante de tiempo. En el caso de una curva nominal de temperatura, la temperatura de diseño es la temperatura correspondiente al tiempo de resistencia al fuego requerido. En el caso de una curva paramétrica la temperatura a considerar puede preceder al tiempo exigido de RF

Para elementos de acero, sólo se necesita observar la máxima temperatura dentro del intervalo entero de temperaturas. Las propiedades mecánicas del acero retornan a sus valores originales en la medida que la carga térmica disminuye



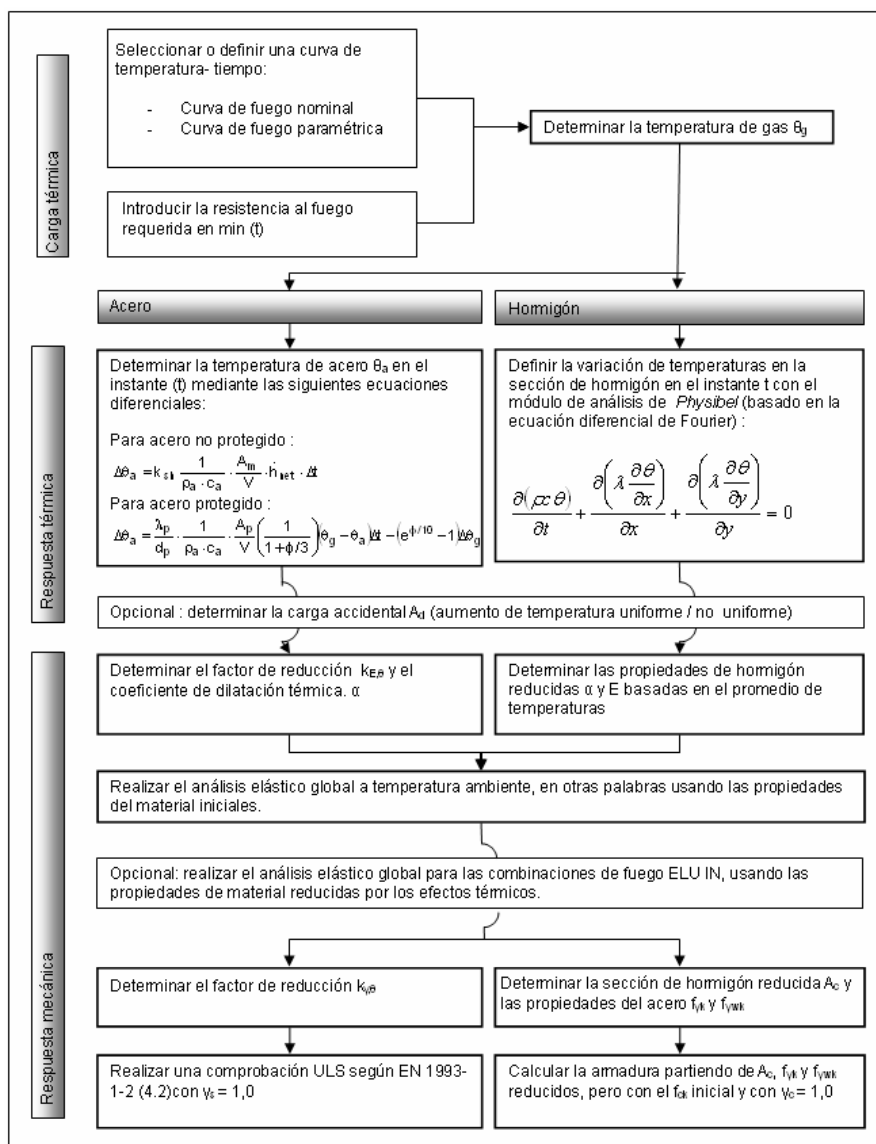
Por otro lado, las características elásticas reducidas del material E y α se determinarán en el instante que el producto $E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ sea máximo. Será en ese momento dónde las fuerzas internas serán mayores

Concretamente, el análisis global se efectúa cuando la acción térmica es máxima. En base a los esfuerzos internos obtenidos, realizaremos un comprobación ya sea un cálculo de cuantía de acero necesaria, considerando una resistencia inferior del acero y hormigón.



El procedimiento anteriormente mencionado se aplica a todos los elementos de los que se calcula la distribución de temperatura con el módulo de cálculo de Physibel.

No se sigue el mismo procedimiento para las secciones de acero en las que el calentamiento ha sido simulado por el método de las diferencias finitas. En este caso, las propiedades de los materiales se determinan siempre para la temperatura que tiene lugar en el momento en que se alcance la resistencia al fuego requerida. Dado que este método sólo se puede aplicar para el caso de una curva de fuego nominal, podemos justificarlo sin problema ya que en una curva de fuego nominal la temperatura nunca disminuye con el tiempo, y la resistencia mas baja se encontrará dónde las temperaturas sean más altas (tiempo de resistencia al fuego requerida). Además la reducción del límite elástico tiene más influencia en la comprobación de la resistencia y pandeo que la acción térmica posiblemente mayor que podría ocurrir en un momento anterior.



3 Análisis de la resistencia al fuego con PowerFrame

3.1 Introducción

En éste capítulo, se describe más detalladamente la utilización práctica del módulo de resistencia al fuego de PowerFrame. Para empezar, podemos decir que el cálculo de resistencia al fuego es una parte integrada en el análisis global de la estructura. Pues no es posible considerar el cálculo de la resistencia al fuego como una etapa adicional que vendría después del análisis global, sino que está totalmente integrada en el proceso de análisis global. Por este motivo, en PowerFrame, el análisis de la resistencia al fuego está totalmente incluido en el análisis global.

Todas las funciones con respecto al análisis de la resistencia de fuego sólo son accesibles si dispone de una licencia válida del módulo de fuego. El módulo de fuego de Powerframe no está disponible para las versiones de evaluación o las versiones demo.

Desde el punto de vista del usuario, habrá poca diferencia entre análisis elásticos con y sin resistencia al fuego. Las diferencias principales relacionadas con la introducción de cargas de fuego, son :

- En la ventana de 'Cargas':
 - o la definición explícita de un grupo de cargas en el que se encuentra la carga de fuego.
 - o La selección o definición de la curva de fuego que representa el ascenso de la temperatura en función del tiempo
 - o La introducción de la resistencia al fuego requerida y la indicación de las barras a las que se aplica la carga de fuego.
 - o La creación de combinaciones accidentales de fuego en estado límite último, aparte de las combinaciones de fuego fundamentales.

- Durante el análisis:
 - o Cuando se realiza el análisis global elástico, se tiene que seguir los siguientes pasos:
 - Se calculan las variaciones de temperatura en la secciones de los elementos del edificio, para determinar las propiedades de material reducidas en uno o más instantes.
 - A continuación, se calculan todos los diferentes grupos de carga y combinaciones. Si se utiliza el método simplificado, el análisis global elástico tiene lugar a la temperatura ambiente. Sin embargo, si el usuario decide tener en cuenta las propiedades elásticas del material en función de la temperatura, en el análisis global elástico se considerarán características reducidas en los materiales para los grupos de cargas 'Fuego' y las combinaciones de fuego accidentales.
 - Finalmente se realiza una verificación de sección (acero) o cálculo de armadura necesaria (hormigón) partiendo de las fuerzas internas obtenidas respectivamente para acero y hormigón.
 - o Nota :
 - las fuerzas internas y las tensiones causadas por las deformación restringidas, se colocan en el grupo de cargas fuego correspondiente. Por supuesto sólo se dará este caso si se incluye la carga de fuego en el cálculo como carga accidental.
- En la ventana de resultados
 - o Ahora, dispone de los resultados de cálculo para todas las combinaciones accidentales de fuego. Aparte de esto, no se observan muchas diferencias del análisis elástico clásico. Además, tenemos que decir que el cálculo de armaduras teóricas (hormigón armado) y las verificaciones de resistencia

y pandeo (acero y madera) tienen en cuenta todas las combinaciones generadas.

- ELU CF (Estado Límite Último, combinaciones fundamentales)
- ELU IN (Estado Límite Último, combinaciones accidentales de incendio)
- ELS CR (Estado Límite de servicio, combinaciones raras)
- ELS CF (Estado Límite de servicio, combinaciones frecuentes)
- ELS CP (Estado Límite de servicio, combinaciones casi permanentes)

o Para las secciones de hormigón y las secciones compuestas el usuario puede observar los incrementos de temperatura, los gradientes, así como las propiedades de la sección reducidas y la distribución de temperatura en dicha sección (cómo un mapa de colores).

3.2 Definición de las cargas de fuego en la ventana de 'Cargas'.

3.2.1 Definir un grupo de cargas para un análisis de fuego.

Mediante el icono  de la paleta en la ventana de cargas, se tiene que definir primero un grupo de cargas específico para la carga de fuego. El grupo de cargas 'Fuego' se encuentra en la parte inferior de la lista de grupos de cargas predefinidos. Note que el icono en la columna a la derecha del cuadro de diálogo se adapta automáticamente al grupo de carga seleccionado. Aunque para los grupos de carga estáticos es posible cambiar este icono directamente en la columna a la derecha (para definir cómo quiere aplicar las cargas seleccionadas en el modelo de cálculo de la estructura), no se puede hacer para el grupo de cargas 'Fuego'.

Coefficientes de cargas y combinaciones:

Coefficientes: Eurocode 1 Normas para sismo: Eurocode 8

☒ 0 - 10
 ☐ 10 - 20
 ☐ 20 - 30
 ☐ 30 - 40
 ☐ 40 - 50

		γ_{u-}	γ_{u+}	γ_{g-}	γ_{g+}	ψ_0	ψ_1	ψ_2	
☒ 0	Peso propio	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
☒ 1	Carga permanente	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
☒ 2	Carga zona oficinas (cat. B)	1.50	0.00	1.00	0.00	0.70	0.50	0.30	
☒ 3	Fuego	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
☒ 4	Viento	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
☒ 5	Temperatura	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
☒ 6	masas sísmicas para el análisis	1.50	0.00	1.00	0.00	0.60	0.50	0.00	
☒ 7	Sísmico cat. I	1.50	0.00	1.00	0.00	0.60	0.50	0.00	
☒ 8	Sísmico cat. II	1.50	0.00	1.00	0.00	0.60	0.50	0.00	
☒ 9	Sísmico cat. III	1.50	0.00	1.00	0.00	0.60	0.50	0.00	
☒ 10	Sísmico cat. IV	1.50	0.00	1.00	0.00	0.60	0.50	0.00	
☒ 11	Fuego	1.50	0.00	1.00	0.00	0.70	0.50	0.30	
☒ 12		1.50	0.00	1.00	0.00	0.70	0.50	0.30	

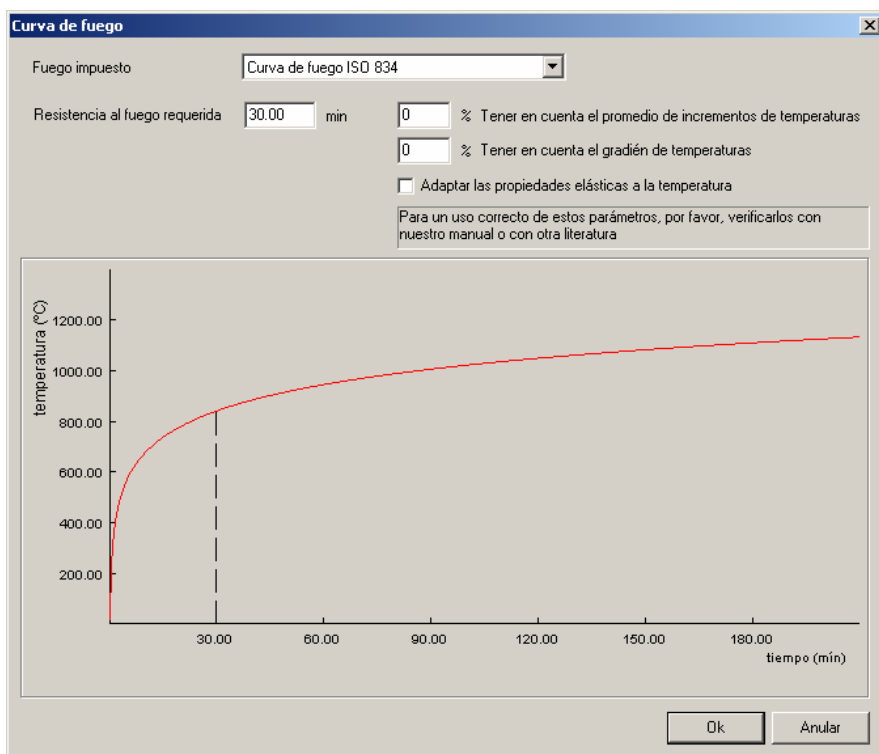
☒ siempre juntos
☒ todas las combinaciones
☒ todas las combinaciones, pero sólo una carga a la vez
☒ acción dinámica
☒ masas sísmicas para el análisis de vibración
☒ acción sísmica
☒ Análisis de resistencia al fuego

Como se considera la carga de fuego como una carga accidental, todos los coeficientes parciales de seguridad toman el valor 1.

3.2.2 Definir una curva de fuego

Activar el grupo de cargas 'Fuego' en el menú desplegable de la paleta en la ventana 'Cargas' para poder definir la carga de fuego. Inmediatamente aparecerán algunos botones en la parte inferior de la

paleta. Apretar el icono  para abrir el siguiente cuadro de diálogo en el que puede definir todos los parámetros de fuego.



Se puede seleccionar una de las tres curvas de fuego nominales predefinidas, o bien puede definir una curva de fuego personalizada, haciendo clic en el botón **Definir curva de fuego** que aparecerá después de seleccionar la última curva de la lista desplegable.

La ventana que aparecerá le permite incluir fácilmente una curva de fuego paramétrica en la lista, sea manualmente o sea por medio de la importación de un fichero txt, pulsando el botón **Coger**. Este fichero de texto puede provenir de una hoja Excel en la que se ha introducido un fuego paramétrico.

Con el botón **Guardar** puede guardar la curva de temperatura-tiempo definida, para que pueda abrirla en otro momento en otro proyecto.

Usar el botón **Nieuw** para suprimir la curva de fuego actual y definir una curva nueva.

Después de haber definido el fuego, seguimos con la definición de la resistencia de fuego, lo que quiere decir el tiempo en que la construcción debe aguantar durante el fuego.

A continuación, introducir la carga térmica que se debe incluir en el análisis elástico global y definir si quiere calcular con propiedades elásticas reducidas para el grupo de cargas 'Fuego' y las combinaciones de fuego accidentales.

t(min)	T (°c)
0	20
1	98.02365
2	167.1599
3	228.4625
4	331.1696
5	331.1690
6	374.1115
7	412.3217
8	446.3593
9	476.7171

Cómo se indicó anteriormente, si se quiere usar el método de diseño tradicional, no se deben considerar las propiedades reducidas del material. Al indicar a PowerFrame que se quiere realizar un cálculo simplificado, se hace un análisis de resistencia al fuego a nivel de del elemento y no es necesario considerar, en los elementos, los efectos de un aumento medio de la temperatura ni gradientes. Por defecto no se consideran estos efectos, valor 0 en estos campos. Además, puede realizar el cálculo de las combinaciones de fuego accidentales partiendo de las características de material elásticas a temperatura ambiente.

Si se decide de no utilizar el método tradicional, se tendrán en cuenta los esfuerzos generados en la estructura por la subida de las temperaturas e impedimento de deformaciones. Posiblemente los gradientes de temperaturas en las secciones generen esfuerzos que se eleven a un nivel dónde será imposible llegar a valores realistas de cuantías de armaduras usando un análisis lineal y elástico. Por lo tanto, PowerFrame le permite realizar un análisis tipo "plástico" para limitar los efectos de los gradientes de temperaturas según un porcentaje de los valores elásticos. En la práctica, esto implica la introducción de rótulas plásticas dentro del análisis y limita el aumento de los esfuerzos una vez se alcanza el límite plástico predefinido.

Mencionamos, que PowerFrame también le permite limitar los efectos del incremento uniforme de temperaturas relacionado con los efectos longitudinales.

Siempre tiene que tener en cuenta los siguientes puntos:

- tan pronto como aumenta la temperatura y/o se consideran los gradientes enteramente o parcialmente como cargas adicionales en las combinaciones de carga accidentales, se tiene que realizar el análisis elástico para estas combinaciones considerando las propiedades de rigidez reducidas.
- Por el contrario, no se pueden ni se deben considerar las cargas térmicas (cargas debido a dilataciones) cuando se realiza el análisis global elástico en las condiciones de temperatura ambiente para los materiales.
- sin embargo se permite usar las propiedades de rigidez reducidas para el análisis global elástico para combinaciones de fuego sin la necesidad de considerar las cargas de temperatura (cargas debidas a las dilataciones)

Después de haber configurado la curva de fuego con los parámetros de diseño correspondientes, se tiene que indicar si quiere atribuir esta carga de fuego a la estructura entera o sólo a una parte de la construcción. Para hacer esto, seleccione las barras expuestas al fuego y haga clic en el



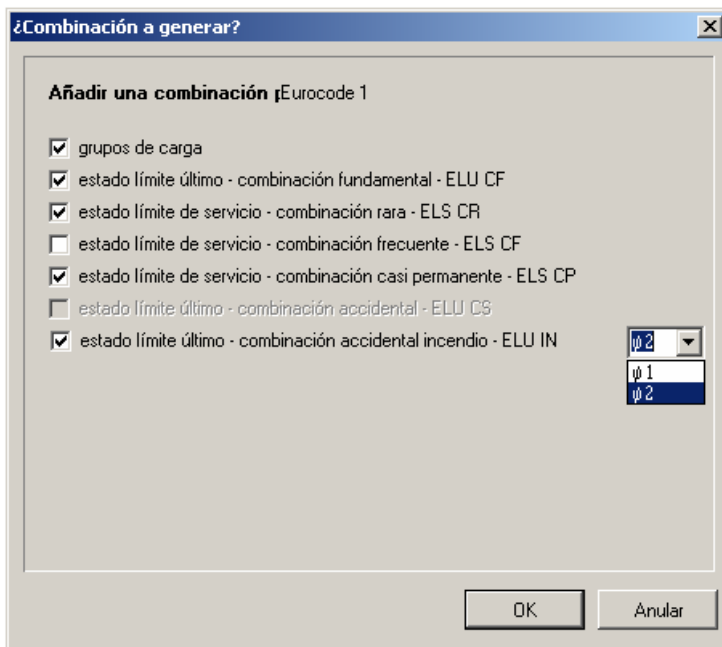
icono de la paleta en la ventana 'Cargas'. Inmediatamente, todas las barras a las que se ha atribuido una carga de fuego, se ven acompañadas de una llama.



Finalmente, para eliminar una carga de fuego, utilice el botón . Atención, se eliminará todas las propiedades de fuego. En otras palabras, si desea atribuir la carga de fuego a una selección de barras nueva, tendrá que repetir el procedimiento anterior.

3.2.3 Generar las combinaciones de fuego

Las combinaciones accidentales de fuego se pueden crear manualmente o generar automáticamente. En el caso de que elija generar las combinaciones automáticamente debe indicar bien qué parte de la carga variable (el valor casi-permanente o el valor frecuente) se debería incluir en las combinaciones de carga.

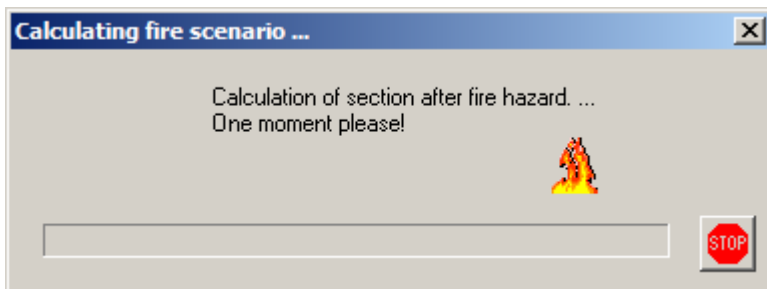


El Eurocódigo prefiere la aplicación del valor casi permanente (ψ_2) para todas las cargas variables. En Bélgica y Francia se prefiere el uso del valor frecuente (ψ_1).

3.3 Análisis de la resistencia a fuego

Después de haber definido todas las propiedades de los materiales y los parámetros de fuego, puede empezar con el cálculo de fuego. Al igual

que cualquier análisis elástico, el cálculo de fuego se activa pulsando el botón . Aparecerá un cuadro de diálogo que le muestra el progreso del cálculo. Note que el puntero se convierte en una llama durante el cálculo.



Primero, se calculará el aumento de la temperatura o la distribución de temperaturas dentro de las secciones de acero y de hormigón. La estrategia para el análisis de la respuesta térmica, dependerá del tipo de sección que se ha definido en la ventana Geometría. En el caso de una sección de acero tomada de la biblioteca de secciones del programa y que no ha sido declarada como "editable" en generador de secciones, y se defina una curva nominal, se calculará el aumento uniforme de temperatura usando un conjunto simplificado de ecuaciones de diferencias finitas. Para cualquier otro tipo de sección, la distribución de temperaturas se calculará usando el módulo integrado Phisibel basado en la ecuación diferencial general de Fourier.

El incremento medio de la temperatura y los posibles gradientes de temperatura se incluirán, como una carga adicional, dentro de el grupo de cargas 'Fuego'. Además, esas temperaturas se usarán para calcular las propiedades reducidas del material y evaluar las propiedades de la sección reducida en el caso de secciones de hormigón.

Finalmente, se calcularán todos los grupos de cargas y combinaciones de cargas. Para todos los grupos de carga individuales (excepto el de fuego) y para todas las combinaciones de carga fundamentales, se usaran las condiciones de temperatura ambiente para el análisis. Para el grupo de carga "Fuego" y para todas las combinaciones accidentales de fuego, el análisis se basará en las propiedades reducidas de los materiales, en el caso de que el usuario haya decidido de NO usar el método convencional de la norma.

Para acero y hormigón, el usuario todavía necesita usar las fuerzas internas calculadas para las verificaciones de resistencia y pandeo (acero) o para el cálculo de la cuantía necesaria (hormigón). Todas las verificaciones considerarán obviamente el sistema completo de fuerza internas, incluyendo las correspondientes a las cargas adicionales generadas por las cargas de fuego y combinaciones de fuego.

Nota: En algunos casos, puede ser necesario revisar las longitudes de pandeo de las barras. De hecho, la rigidez de las barras expuestas a fuego puede reducirse significativamente lo que puede hacer que las longitudes de pandeo aumenten o disminuyan. Tenga en cuenta que el cálculo automático de longitudes de pandeo siempre se realiza para temperatura ambiente y no se considera ninguna reducción en la rigidez debido a las cargas de fuego.

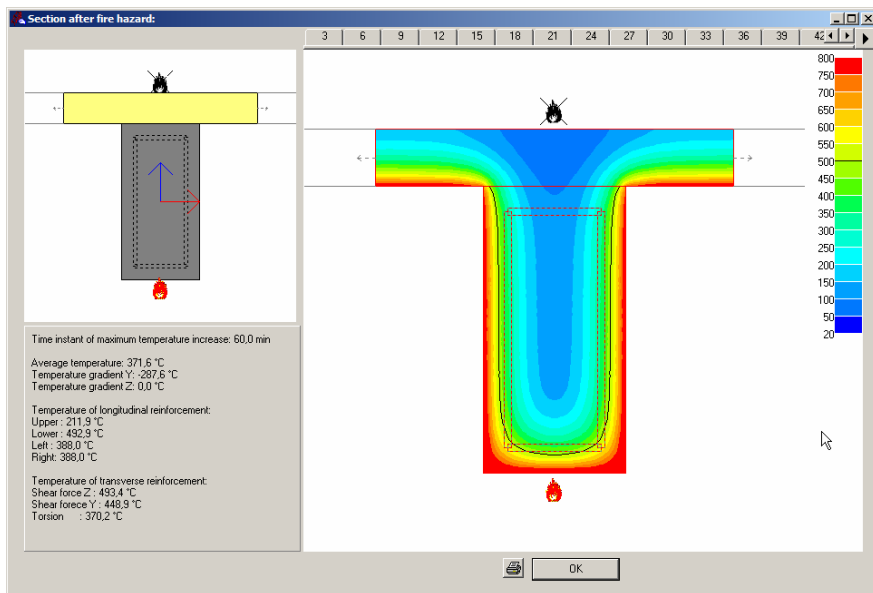
3.4 La sección después del fuego

La paleta de la ventana 'Diagramas' le permite visualizar todos los tipos de resultados familiares (desplazamientos, esfuerzos, tensiones, reacciones), incluido el grupo de carga 'Fuego' y las combinaciones en la que se han incluido la carga de fuego accidental.

Además, para las secciones en las que la distribución de temperatura se determinó mediante el módulo de cálculo de Physibel, tendrá acceso a todos los resultados del cálculo de la respuesta térmica. Después de hacer doble clic en la barra, expuesta al fuego, en la ventana 'Diagramas' aparecerá un cuadro de diálogo con una representación detallada de la distribución de temperaturas en sección para diferentes instantes de tiempo.

Al lado izquierdo verá una representación de la sección en consideración expuesta al fuego. Debajo de la representación están los tiempos para los que se han calculado las propiedades reducidas. Mientras que se emplea el primer tiempo para el cálculo de las características de resistencia reducida, se utilizará el segundo tiempo para determinar las propiedades elásticas reducidas. Además, hay una descripción del aumento promedio de las temperaturas y los gradientes según los dos ejes de inercia principales. Para las secciones de hormigón armado, se puede encontrar también las temperaturas para las armaduras longitudinales y transversales. Puede consultar esta información en cualquier momento.

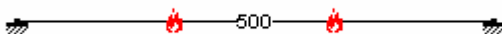
A la derecha se encuentra una imagen de la distribución de la temperatura a lo largo de la sección. Haciendo clic en el botón  en la parte superior a la derecha arrancará una representación animada del calentamiento de la sección.



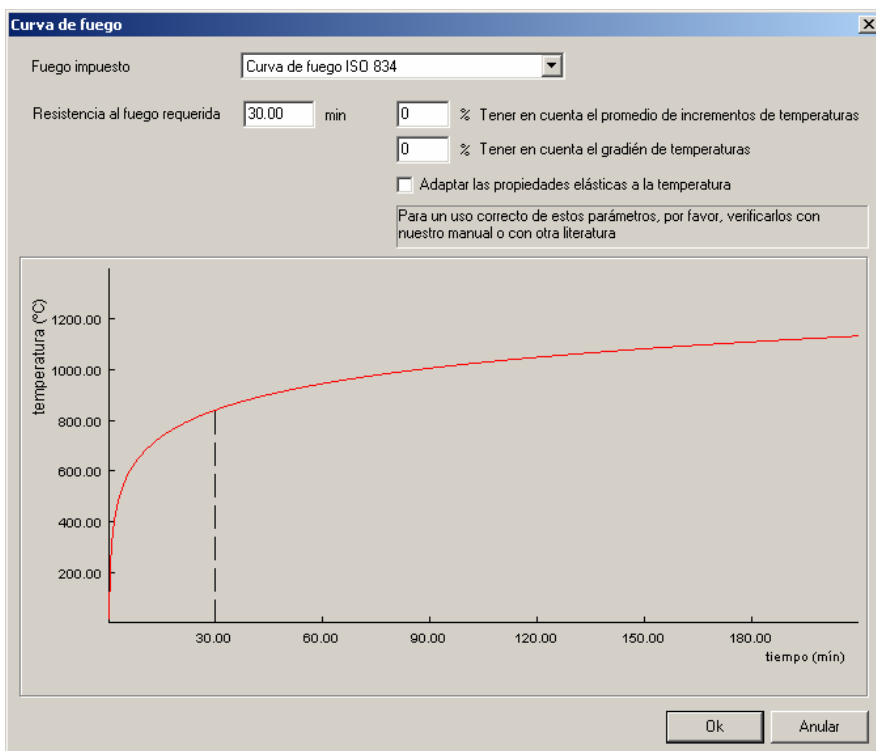
La iso-línea que equivale a una temperatura de 500°C se visualiza en negro. Visto que no se tiene en cuenta el hormigón con una temperatura mayor que 500°C para el cálculo de la cuantía de armadura teóricas, le puede formar una imagen de la sección reducida después del fuego. Note que también se puede visualizar las características de la sección reducida junto con todas las propiedades de resistencia reducidas al crear una vista preliminar con el botón . Para guardar la nota de cálculo como un fichero RTF haga clic en el botón .

4 Ejemplos

El uso del módulo de fuego de PowerFrame, se presenta mediante el ejemplo siguiente. Suponemos una viga con una longitud de 5 metros completamente empotrada por ambos extremos. Esta viga sostiene su propio peso y una carga permanente de 30 kN/m y una carga variable de 50 kN/m.



Se requiere que esta viga mantenga su capacidad portante hasta 30 minutos en el caso de un incendio. No tenemos información adicional con respecto al comportamiento del fuego y por lo tanto asumimos que se puede aplicar un fuego estándar ISO834.



El análisis de fuego se realizará según el método simplificado, en otras palabras, no tendremos en cuenta posibles fuerzas internas que se generan como consecuencia de la deformación restringida. Además, para las combinaciones ELU IN se realizará el análisis global elástico partiendo de las propiedades de rigidez inicial (o sea, las propiedades de material del acero a temperatura ambiente)

También tendremos en cuenta, que las combinaciones de carga accidentales de fuego sólo consideran el valor casi permanente de las cargas variables (ψ_2).

Ahora trataremos brevemente las respuestas térmicas y mecánicas de algunos tipos de secciones.

4.1 Sección HEA desprotegida

4.1.1 Expuesta al fuego por todos lados

Se considera una sección HEA 300 sin ninguna forma de protección. Un análisis elástico y unas verificaciones a temperatura ambiente, demuestran que esta clase de sección es la elección mas económica para las cargas y longitud dadas. Sin embargo, considerando la alta conductividad térmica del acero, se espera que esta viga falle muy pronto una vez el fuego se empieza a desarrollar

Como consecuencia del ascenso de la temperatura ($\Delta T = 740,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ después de 30 minutos). La tensión de fluencia se reducirá a 37 N/mm^2 . Usando esta propiedad reducida, se pueden realizar unas verificaciones según Eurocódigo 3. Los resultados son los siguientes:

Verificación de resistencia barra 1 (nudo 1 - nudo 2):
sección: HEA-300 orientación: 0.00 ° fy : 37.06 N/mm²

esfuerzo normal de tracción	0.00 %
esfuerzo normal de compresión	0.00 %
momento My'	204.77 %
momento Mz'	0.00 %
esfuerzo cortante Vz'	143.80 %
esfuerzo cortante Vy'	0.00 %
momento My' + esfuerzo cortante Vz'	263.54 %
momento Mz' + esfuerzo cortante Vy'	0.00 %
momento My' y Mz' + esfuerzo normal	204.77 %
momento My' y Mz' + esfuerzo cortante Vz' y Vy' + esfuerzo normal	215.70 %
torsión	0.00 %

detalle verificación : momento My' + esfuerzo cortante Vz'
máximo en el nudo 1
Para la combinación ELU IN 1
Vz = 114.708 kN, My = 95.590 kNm
Avz = 37.28 cm², Wply = 1383271.5 mm³, ro = 0.39
Vz.Rd = 79.768 kN, My.Rd = 36.271 kNm

Temperatura del acero = 760.24°C OK

Verificación de pandeo barra 1 (nudo 1 - nudo 2):
sección: HEA-300 longitud: 500 cm orientación: 0.00 ° fy : 37.06 N/mm²
L pandeo alrededor eje y' 50 %L ☒ **Re calcular riesgo pandeo**
L pandeo alrededor eje z' 50 %L
Longitud de pandeo lateral z' > 0 100.00 %L ☒ extremos articulados por torsión (k=1)
z' < 0 100.00 %L ☒ extremos articulados por alabeo (kw=1)
Longitudes de pandeo y pandeo lateral

esfuerzo normal, pandeo en plano y'	0.00 %
esfuerzo normal, pandeo en plano z'	0.00 %
pandeo lateral	284.85 %
esfuerzo normal y momento, pandeo	0.00 %
esfuerzo normal y momento, pandeo lateral	0.00 %

detalle verificación : pandeo lateral
máximo en el nudo 1
Para la combinación ELU IN 1
My = 95.590 kNm
clase de sección: 3
Wply = 1259549.4 mm³
C1 = 1.29, Mcr = 1205.735 kNm
lambda.LT = 0.50, sigma.LT = 0.21, chi.LT = 0.72
Mb.Rd = 33.959 kNm

Temperatura del acero = 760.24°C OK Anular

Aunque un HEA 300 es perfectamente capaz de soportar las cargas bajo condiciones normales, este perfil no es capaz de aguantar el tiempo requerido en situación de incendio. Este resultado no es nada sorprendente si nos fijamos en el incremento de temperatura que sufre el perfil y el deterioro de las propiedades del material.

Las verificaciones de resistencia y pandeo de un elemento expuesto a un fuego, se realizan de la misma manera que a temperatura ambiente, a excepción de los siguientes puntos:

- La clasificación de la sección tiene lugar partiendo de las propiedades de acero reducido. Aproximadamente realizamos la clasificación usando el siguiente valor de $\varepsilon = 0.85 \sqrt{235 / f_y}$;
- Las esbelteces relativas se calculan en función de las propiedades del material acero a 20°C. Posteriormente, estos valores se corrigen multiplicándolos por el factor $\sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$;
- El factor de imperfección para los cálculos de pandeo y pandeo lateral se determina, usando
- $\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y}$; (Éste punto se refiere a la modificación de las curvas de pandeo)
- Para las secciones de clase 1, 2 y 3 se realizan verificaciones con el límite elástico reducido. Para las secciones de clase 4 las propiedades de la sección efectivas (utilizadas en las fórmulas de verificación) se calculan en base a las propiedades mecánicas para 20°C. Sin embargo, el

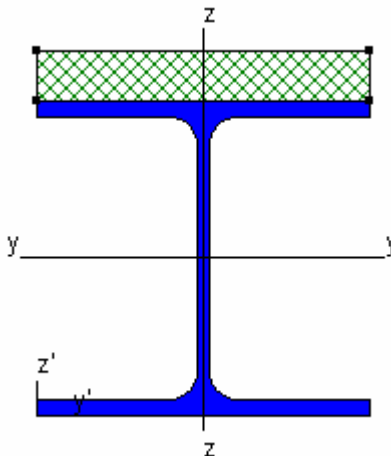
límite elástico se debe reemplazar por el reducido considerando el límite deformación 0.2% $f_{p0,2,\theta}$.

4.1.2 Expuesto a fuego por sólo 3 lados.

Anteriormente se asumía que todos los lados estaban expuestos a fuego. Ahora, suponemos que no es posible el suministro de calor por la parte superior del perfil. En este caso basta llevar el perfil al “Editor de Secciones” y proveer la parte superior de un material llamado “Fire buffer”. Por definición, este “Fire buffer” simplemente es un material definido con una conductividad de calor infinitamente pequeña. Dentro del Editor de Secciones, se debe proceder de la siguiente manera:

- Dibuje una sección rectangular con dimensiones aleatorias que concuerde con la parte superior del perfil.
- Haga doble clic en la sección que acaba de definir y seleccione la segunda pestaña ‘Material’.
- Seleccione en la lista el material “fire buffer”. Dejar el material estándar ‘AceroFe360’ sin cambiar.

El dibujo resultará como sigue:



Ahora lleve esta sección a PowerFrame, haga clic en  y complete la verificación de resistencia y de pandeo. Note que la presencia de un “fire

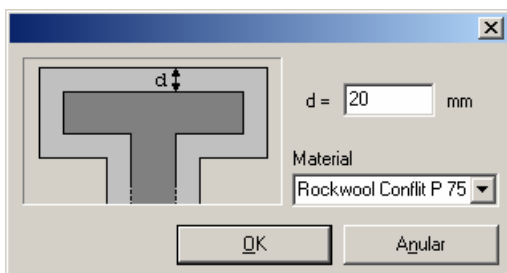
buffer" no influye mucho en los resultados. La temperatura de acero siempre es 740,1°C después de 30 minutos.

4.2 HEA perfiles protegidos

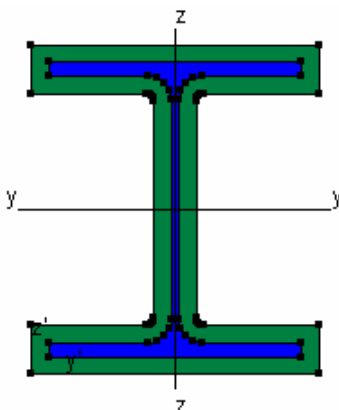
Ahora estudiamos el caso del mismo perfil HEA 300, pero ahora se protege por un material aislante térmico. Para poder definirlo, abrimos el editor de secciones y aplicamos una capa de aislamiento al perfil entero (Rockwool Conflit P 756, espesor 2cm).



Seleccione el perfil con el botón izquierdo del ratón y haga clic en , aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

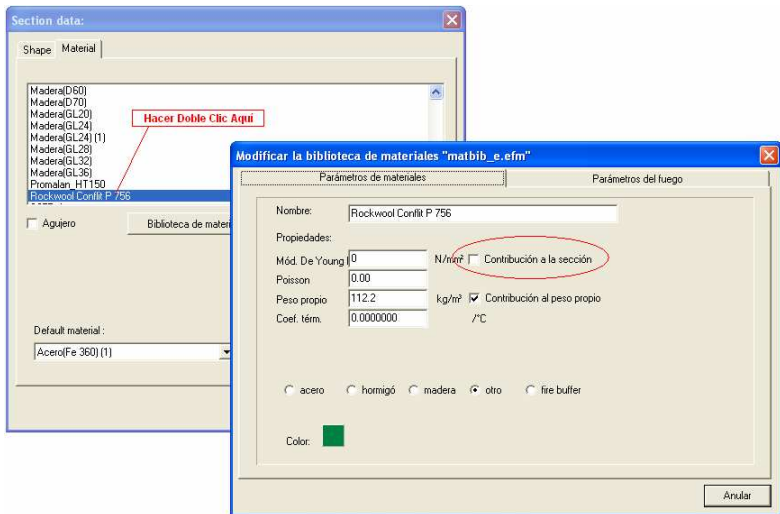


Especificar el espesor de la capa de aislamiento y seleccione el material adecuado. Después de la confirmación el perfil debería parecerse a la siguiente imagen:



Notas:

- Note que las propiedades mecánicas de la sección transversal, no se ven alteradas por esta capa de aislamiento, con excepción del peso propio. Ciertamente, la capa de aislamiento no tiene en absoluto ninguna contribución en las propiedades de rigidez en la sección



- Antes de aplicar la capa aislante a la sección, el usuario puede definir la sección HEA como “Editable”. En este caso, PowerFrame considerará la sección como una sección compuesta y no como una sección de acero protegida. En este caso, el análisis térmico lo realizará el motor de cálculo Phisibel para tipos de secciones arbitrarias.
- También, cuando se define un material aislante con un espesor variable, la variación de temperaturas en la sección, se calculará con el módulo de cálculo de Physibel. En este caso, todavía sí podemos realizar una verificación de resistencia y pandeo.

Realizamos ahora un análisis global elástico y hacemos una verificación de resistencia y pandeo. Visto que el perfil HEA no se ha definido como “editable” en el generador de secciones, haremos uso de las diferencias finitas para los perfiles de acero protegidos para el análisis de la respuesta térmica.

Verificación de pando Barra 1 (nudo 1 - nodo 2):

sección: HEA300 longitud: 500 cm orientación: 0.0 ° fy: 53.87 N/mm²

l pando alrededor eje y' 50.00 %L 

l pando alrededor eje z' 50.00 %L

Longitud de pando lateral ≥ 0.00 %L ☒ extremos articulados por torsión (k=1)

≥ 0.00 %L ☒ extremos articulados por alabeo (k=1)

Longitudes de pando y pando lateral

esfuerzo normal, pando en plano y'	0.00 %
esfuerzo normal, pando en plano z'	0.00 %
▶ pando lateral	196.07 %
esfuerzo normal y momento, pando	0.00 %
esfuerzo normal y momento, pando lateral	0.00 %

detalle verificación : pando lateral
máximo en el nodo 2
Para la combinación ELU 1
My = 95.641 kNm
Clase de sección 3
W_{el,y} = 1235945.4 mm³
C1 = 1.28, M_{cl} = 1205.735 kNm
IambdaLT = 0.50, sigmaLT = 0.21, chiLT = 0.72
Mb.Rd = 49.778 kNm

Temperatura del acero = 700.63°C

   OK Anular

Esta conclusión no nos tendría que sorprender, ya que éste tipo de material aislante a partir de 400°C empieza a perder su capacidad aislante. Por lo tanto, este tipo de material no es adecuado cuando se requieren demandas severas de resistencia al fuego. En este caso es aconsejable elegir otro tipo de material aislante (el yeso) el cual la conductividad térmica sólo aumenta ligeramente con temperaturas muy altas. Del informe de cálculo, se puede observar que la temperatura en el acero después de 30 minutos sólo es de 291°C. Visto que el límite de fluencia con este temperatura siempre es 235 N/mm² , los resultados no difieren mucho del cálculo de acero a temperatura ambiente. De los siguientes cuadros de diálogo, podemos observar que la combinación ELU CF 1, es una combinación más crítica que la combinación accidental de fuego.

Verificación de resistencia barra 1 (nudo 1 - nodo 2):

sección: HEA300 orientación: 0.00 ° fy: 235.00 N/mm²

esfuerzo normal de tracción	0.00 %
esfuerzo normal de compresión	0.00 %
momento My	82.49 %
momento Mz	0.00 %
esfuerzo cortante Vz	63.62 %
esfuerzo cortante Vy	0.00 %
momento My + esfuerzo cortante Vz	84.34 %
momento Mz + esfuerzo cortante Vy	0.00 %
momento My y Mz + esfuerzo normal	82.49 %
momento My y Mz + esfuerzo cortante Vz y Vy + esfuerzo normal	84.68 %
torsión	0.00 %

detalle verificación : momento My y Mz + esfuerzo cortante Vz y Vy + es:
máximo en el nodo 1
Para la combinación ELU CF 1
N = 0.000 kN (tracción), Vz = 292.623 kN, Vy = 0.000 kN, My = 243.769 kNm, Mz = 0.0 kNm
clase de sección: 2 (sólo para superficies para esfuerzo normal)
A = 112.53 cm², Avz = 37.28 cm², Avy = 93.66 cm²
Wplz = 1363271.5 mm³, Wplz = 641166.0 mm³, roy = 0.00, rox = 0.07
Npl,Rd = 2404.003 kN, Vz,Rd = 459.795 kN, Vy,Rd = 1155.203 kN
My,Rd = 287.866 kNm, Mz,Rd = 136.976 kNm

OK

Verificación de pandeo barra 1 (nudo 1 - nodo 2):

sección: HEA300 longitud: 500 cm orientación: 0.00 ° fy: 235.00 N/mm²

l. pandeo alrededor eje y: 50.00 %L ☒ z
l. pandeo alrededor eje z: 50.00 %L

Longitud de pandeo lateral: z > 0: 100.00 %L ☒ extremos articulados por torsión (k=1)
z < 0: 100.00 %L ☒ extremos articulados por alabeo (kw=1)

Longitudes de pandeo y pandeo lateral

esfuerzo normal, pandeo en plano y'	0.00 %
esfuerzo normal, pandeo en plano z'	0.00 %
pandeo lateral	89.84 %
esfuerzo normal y momento, pandeo	0.00 %
esfuerzo normal y momento, pandeo lateral	0.00 %

detalle verificación : pandeo lateral
máximo en el nodo 2
Para la combinación ELU CF 1
My = 243.769 kNm
clase de sección: 2
Wplz = 1363271.5 mm³
C1 = 1.28, Mcr = 1205.735 kNm
lambdaLT = 0.52, sigmaLT = 0.21, chiLT = 0.92
Mb,Rd = 271.342 kNm

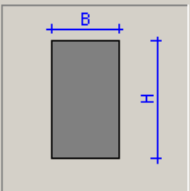
OK Anular

4.3 Sección rectangular en hormigón armado.

Para definir una sección de hormigón armado, el usuario tiene varias maneras de hacerlo. Bien se define la sección en PowerFrame en base a una sección basada en formas tipo predefinidas, o bien, puede crear una sección personalizada utilizando el Generador de Secciones. En el primer caso, sólo se tiene que introducir un recubrimiento de hormigón y las armaduras se suponen a esta distancia constante de los bordes del perfil. En el segundo caso usted tiene que dibujar las zonas de armadura. Éste último procedimiento ofrece muchas mas posibilidades (aplicar diferentes calidades de acero y diferentes recubrimientos, definir áreas de refuerzos en secciones con formas arbitrarias...).

Elegimos la segunda opción y definimos en el editor de secciones una sección rectangular R30/40 con una calidad de hormigón C25/30.

Sección:



B 300 mm H 400 mm

material: Beton(C25/30)

OK Anular

Ahora usamos el botón  para definir las zonas de armadura. Introduzca en el cuadro de diálogo que quiere posicionar la armadura superior primero.

Selection of reinforcement areas

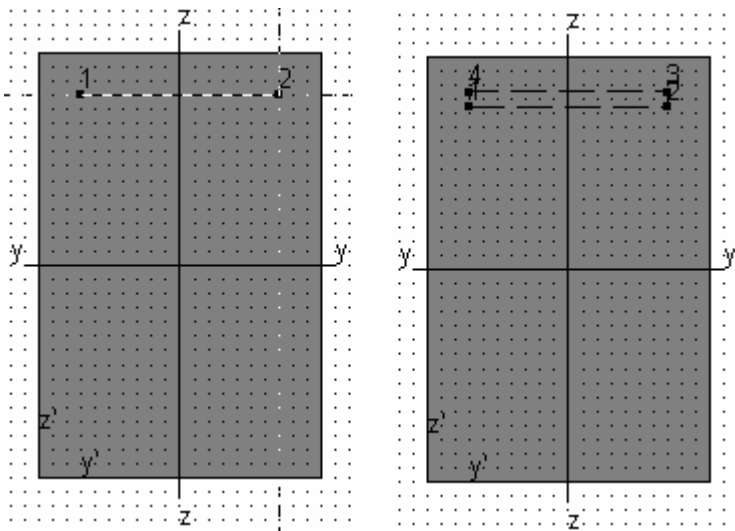
☒ Arriba

☐ Izquierda ☐ Derecha

☐ Abajo

OK Cancel

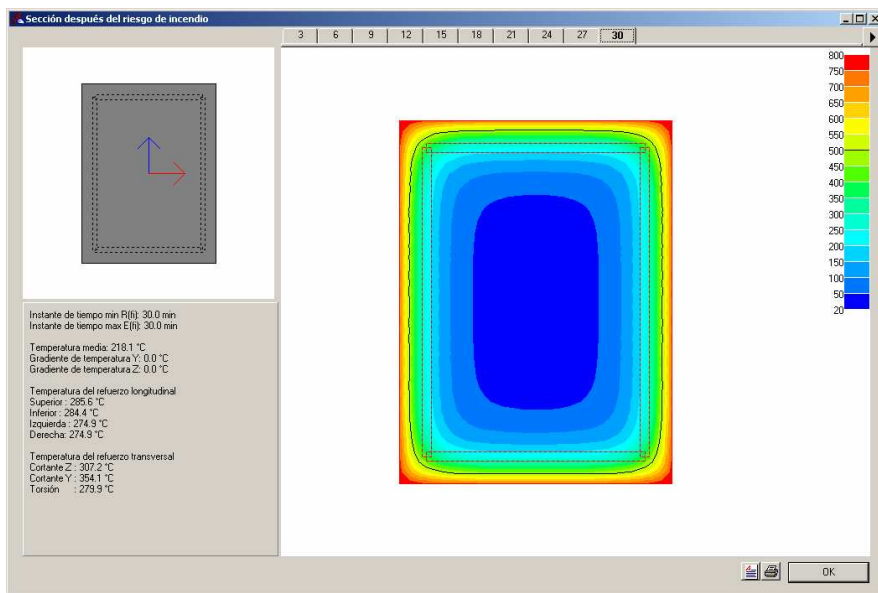
Luego dibujar la línea del centro de gravedad del área de armaduras a 30 mm del borde superior del perfil y haga clic en el botón derecho.



Repita esta acción para definir las zonas de armadura a la parte inferior, a la izquierda y a la derecha.

Nota: La definición del área transversal, es necesaria para poder calcular la armadura necesaria para el cortante.

Finalizamos el análisis elástico y hagamos doble clic en la viga en la ventana de 'Diagramas' para examinar la distribución de la temperatura de la sección.



Después de 30 minutos, el perfil tiene una temperatura media de 218.2°C. Dado la simetría doble de la sección y el hecho de que todos los lados de la sección de hormigón están expuestos al fuego, no aparecerán gradientes de temperatura. Esto implica que sólo aparecerían fuerzas de compresión por el impedimento de la dilatación, en el caso de que se tuvieran en cuenta las cargas térmicas adicionales.

Además en esta ventana encontrará toda la información necesaria para el cálculo correcto de las armaduras. Las calidades disminuidas de acero en las armaduras longitudinales y transversales, se calculan a partir de la temperatura media en las armaduras. Las propiedades de resistencia de la sección reducida, se resume en una nota de cálculo que puede consultar pulsando el botón



4.4 Sección-T de hormigón armado.

Ahora vamos a suponer que la viga de R30/40 se fabrica in-situ junto con una losa por encima. Se considera un espesor de losa de 150mm y un ancho eficaz de la losa de 1000mm. De esta manera definiremos una sección T en PowerFrame con las siguientes dimensiones:

Sección:

sección: T

forma: sección T

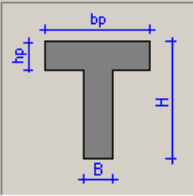
material: Hormigón(C25/30)

☒ Recubrimiento bruto: 35 mm

B 300 mm H 550 mm

bp 1000 mm

hp 150 mm



superf. 2700.00 cm² peso 688.3 kg/m

eje fuerte y-y: 

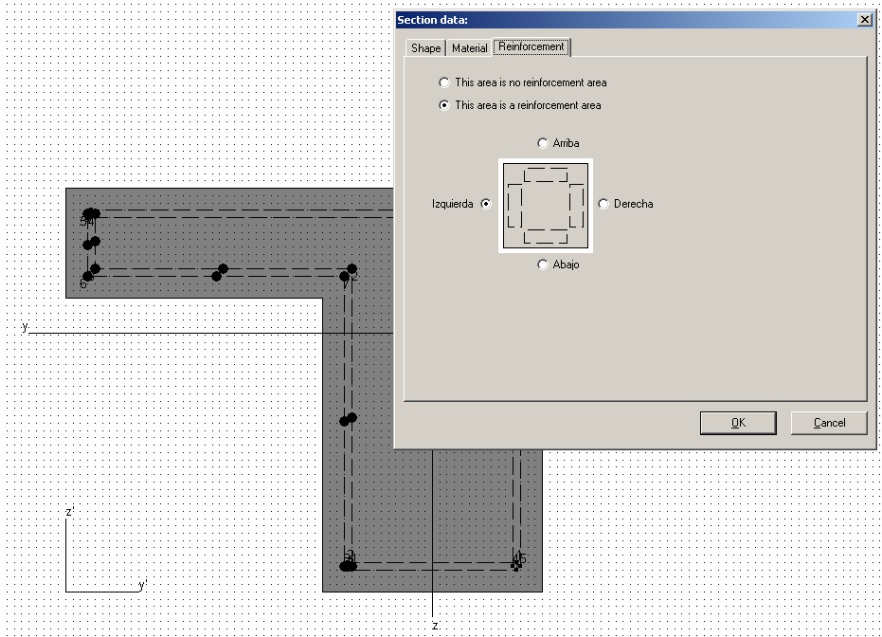
eje débil z-z: 

Iy	6922916666.7	mm ⁴	Iz	13400000000.0	mm ⁴
Wy	19624015.7	mm ³	Wz	26800000.0	mm ³
Wply	37335648.1	mm ³	Wpl,z	46500000.0	mm ³
iy	160.1	mm	iz	222.8	mm
Avz	1080.00	cm ²	Avy	2700.00	cm ²
IT	4725000000.0	mm ⁴	☒ calcular		
Iw	0.0	mm ⁶			

A continuación seleccionamos este perfil y hacemos clic en el botón derecho. Ahora aparecerá un menú emergente con una imagen de la sección que acabamos de definir.



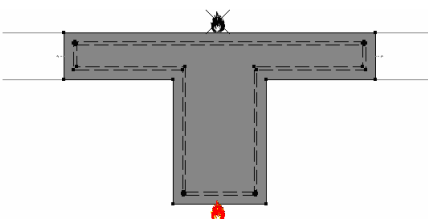
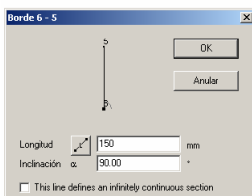
Haga clic en esta imagen para arrancar el generador de secciones. Notará que se reconocerán las zonas de armadura automáticamente. Haga doble clic en, por ejemplo, un área de la armadura de la izquierda y active la tercera pestaña.



Nota: La armadura transversal se supone como distribuida regularmente sobre la zonas de armadura definidas. Las cuantías de armadura calculadas relacionadas con el momento respecto al eje débil de la sección, dependerá de la posición y la forma de la zona de armaduras correspondiente.

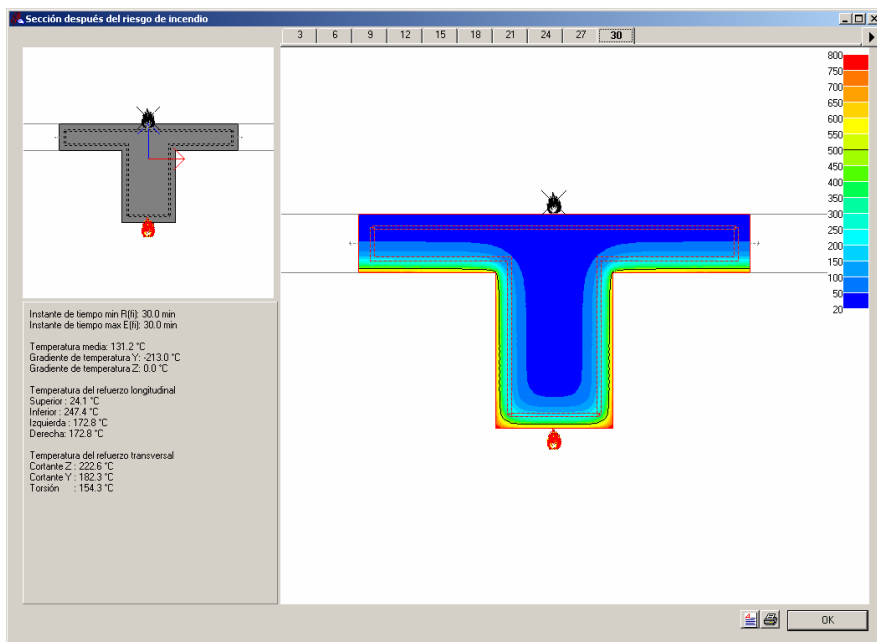
Además queremos imponer que el fuego sólo incida en la parte inferior de la viga y la losa. Por eso seguimos el siguiente procedimiento:

- Definir el perfil cómo editable de la siguiente manera, seleccionar perfil > edición → hacer un perfil editable.
- Haga doble clic en los bordes de la placa a la izquierda y a la derecha y define la forma de la placa · en realidad. El generador de secciones, distinguirá dos compartimentos de fuego y lo indica mediante una llama.



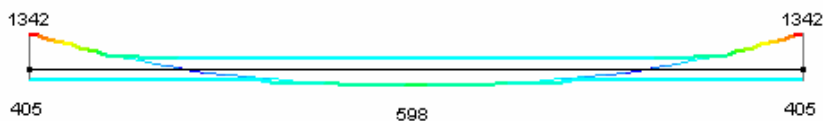
- Apagar la llama con el ratón para especificar que no hay suministro de calor desde la parte de arriba hacia la losa. El color de la llama cambiará de rojo a negro.

Ahora que todas las propiedades de la sección están definidas, podemos iniciar el análisis térmico y elástico. Esto nos dará como resultado la distribución siguiente en la sección transversal en $t = 30$ minutos:



Como consecuencia de la asimetría de la sección respecto al eje “y” y debido al calentamiento irregular en la sección, surgen gradientes de temperatura respecto el eje y local. Sin embargo, cómo se ha usado el método estándar, no se han tenido en cuenta las cargas térmicas adicionales que surgen de las deformaciones, y no harán que aumenten los esfuerzos internos en los elementos.

Observe que las armaduras no quedan alteradas en relación a un cálculo a temperatura ambiente. El aumento de temperaturas provoca una disminución de la sección y una alteración de las características mecánicas de los materiales, pero otra vez mas, en este ejemplo, las combinaciones ELU CF, ELS CP y ELS CR son más restrictivas que las combinaciones de fuego. Cómo la losa es ahora parte de la sección resistente, la armadura inferior puede reducirse.



Nota general:

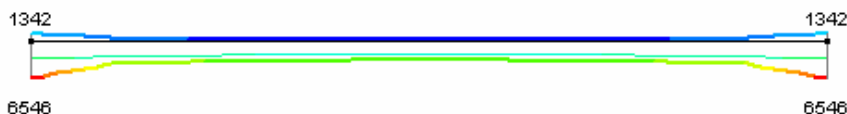
Podemos concluir que el cálculo a resistencia al fuego tiene poca o ninguna influencia en la armadura. Los motivos son varios.

Por un lado, el calentamiento de una sección de hormigón armado es demasiado bajo para obtener una recaída notable en las propiedades de resistencia. Por otro lado, no se tiene en cuenta el efecto de las fuerzas internas debidas a dilataciones, que aparecerían debido a un ascenso de temperatura y a la aparición de gradientes de temperatura.

Por un instante, desviamos del método simplificado propuesto en la norma e incluimos integralmente las cargas debidas al ascenso de temperatura y a los gradientes de temperatura. Además, indicamos que queremos calcular con las propiedades elásticas reducidas para las combinaciones de carga ELU IN.

Si la viga pudiese rotar libremente a los extremos, la viga podría flectar hacia abajo (siempre tiene lugar en la dirección dónde la temperatura es más alta). Sin embargo, visto que la viga está empotrada a ambos extremos, los gradientes harán surgir importantes momentos negativos en la viga (- 676,6 kNm).

No obstante, sigue siendo posible calcular la armadura para momentos tan grandes. La razón está en el hecho de que se generan fuerzas de compresión enormes en la sección por lo cual las fuerzas de tracción en la zona de tracción se reducirán notablemente.

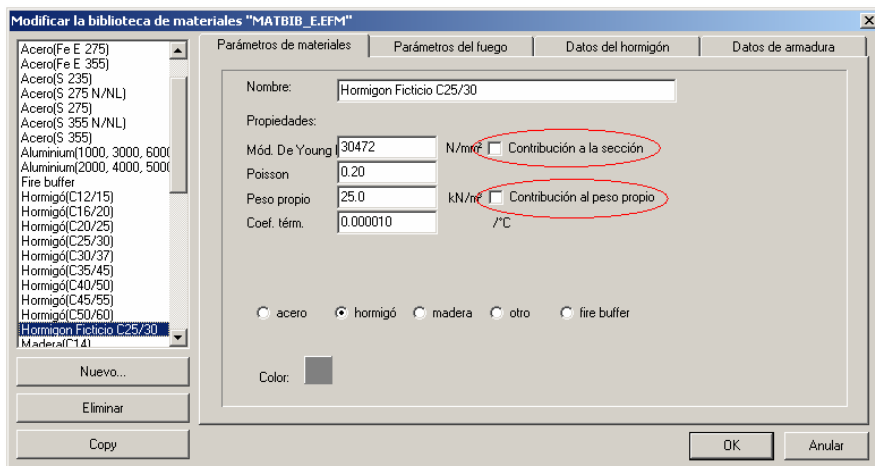


4.5 Una losa sobre una viga R30/40

Repetimos el ejemplo anterior, pero ahora suponemos que la placa no contribuye a la rigidez de la viga

R30/40. Además, suponemos que el peso propio de la placa (3,75 kN/m) se ha incluido en la carga permanente, de tal forma que sólo tenemos que calcular el efecto de la inercia térmica de la placa sobre la viga en el caso de un fuego. El fuego sólo está a la parte inferior de la placa.

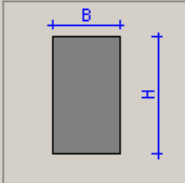
Antes de dibujar la sección, definimos un material nuevo Hormigón ficticio C25/30' en el que el peso propio y la rigidez no se activan. Abrimos la biblioteca y creamos una copia del material 'Hormigón (C25/30)'. Desactivamos la contribución del módulo E y del peso propio. Todos los demás parámetros se dejarán sin modificar:



Ahora seguimos los siguientes pasos:

- Definir en PowerFrame una viga rectangular con las dimensiones 300x400mm, el recubrimiento de hormigón de 35 mm y el material Hormigón (C25/30)'.
- En el editor de secciones, dibujar una placa con una sección rectangular de 1000x150mm pulsando en el botón . Asegúrese que haya indicado el material correcto!

Sección:



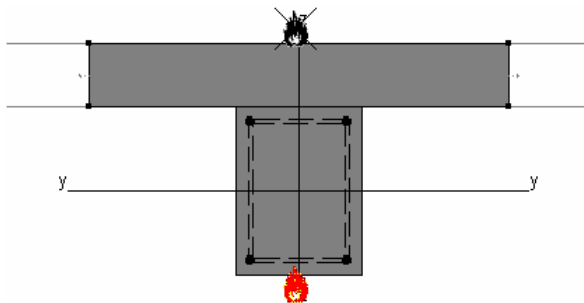
B 1000 mm H 150 mm

material: Acero(Fe 360) conformado en caliente

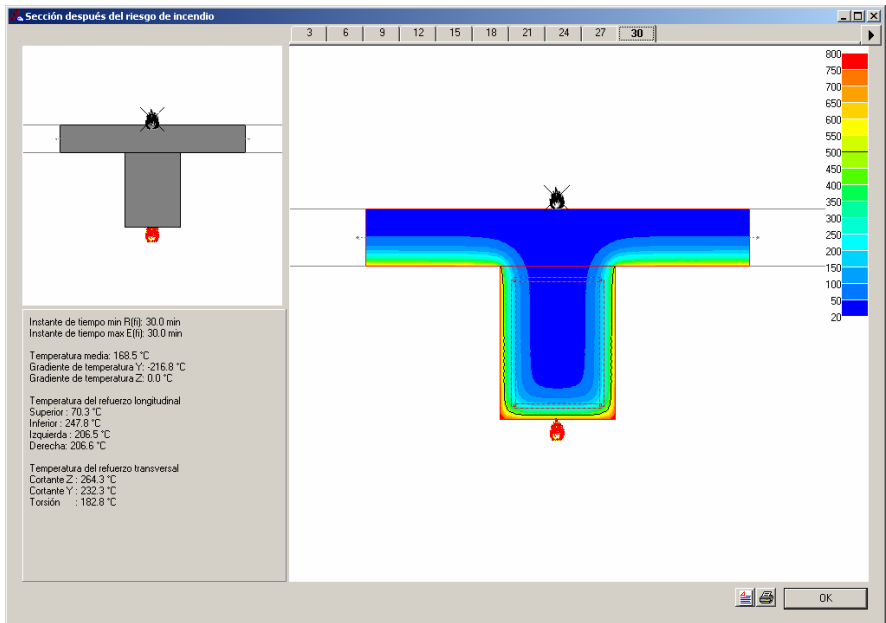
Hormigó(C35/45)
 Hormigó(C40/50)
 Hormigó(C45/55)
 Hormigó(C50/60)
 Hormigón Ficticio C25
 Madera(C14)
 Madera(C16)
 Madera(C18)

OK Anular

- Comprobar que tanto las propiedades de resistencia como el peso propio no se han tomado en cuenta. A continuación, posicionar la placa.
- Hacer la placa “editable”, y hacer doble clic en los bordes de la placa a la izquierda y a la derecha y seleccionar la opción “definir la forma de la placa en realidad” (ver en el ejemplo anterior)
- Finalmente, apagar la llama con el ratón para especificar que el fuego está en el compartimiento de debajo.



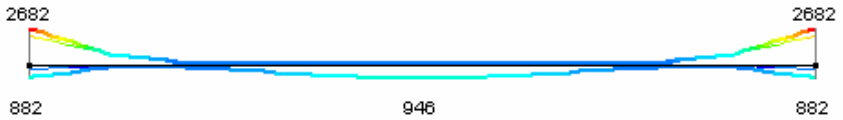
Llevamos este perfil a PowerFrame y realizamos el análisis. La distribución de temperatura se muestra a continuación:



Podemos hacer las siguientes conclusiones:

- La distribución de temperaturas es independiente de las propiedades de resistencia de una sección compuesta. En otras palabras, podemos decir que encontramos la misma distribución de temperatura que en el ejemplo anterior.
- La temperatura media del perfil se ha aumentado notablemente. Se calcula la temperatura media en base a la sección resistente, en este caso, sólo la sección rectangular R30/40.
- A excepción de la armadura inferior, todas las temperaturas del acero en armaduras has aumentado. Puesto que, ahora las zonas de armadura se encuentran en el alma del perfil compuesto.

Finalmente calculamos la armadura.



Con respecto al ejemplo anterior la armadura necesaria ha aumentado más del doble. El momento de inercia de la sección rectangular es notablemente inferior que la de la sección T compuesta. De nuevo, las combinaciones ELU CF, ELS CP y ELS CR son más restrictivas que las combinaciones de fuego.