Resumen

El presente proyecto consiste en realizar procedimientos de cálculo para analizar el comportamiento de una nave industrial TIPO sometida a fuego ISO y a fuego real, mediante modelos de cálculo simplificado, según norma europea Eurocódigo3 parte 1-2 “Estructuras expuestas al fuego” [1], y modelos de cálculo avanzado según el método de los elementos finitos. Se utiliza el preprocesador WIZARD para introducir vigas y pilares como elementos finitos, el procesador SAFIR 2004 que calcula el análisis térmico y mecánico de la estructura metálica de la nave y el postprocesador DIAMOND que da resultados gráficos del desplazamiento del pórtico o de la distribución de temperaturas los elementos constructivos de la nave. Estos cálculos son necesarios para conseguir un alto nivel de seguridad ante un incendio.

Este proyecto tiene como objetivo determinar la seguridad de la nave, es decir, establecer la necesidad, en su caso, de proteger los elementos estructurales e introducir las mejoras necesarias para optimizar el comportamiento de la estructura metálica de la nave TIPO en caso de incendio.

El estudio permite determinar el modo de fallo de la estructura de la nave y el momento de colapso, lo que se conoce como Resistencia al Fuego de la estructura, permite saber si el colapso es hacia el interior o hacia el exterior y establecer si la nave es segura frente un incendio y si existe peligro para los ocupantes, para los bomberos, o para terceros. Se siguen los requerimientos del RSIEI [2] (Reglamento Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales).

Se realizará con el programa SAFIR2004 el análisis de la estabilidad al fuego de tres pórticos de tres naves TIPO que comparten estructura (pilares HEB220) y cerramiento (placas de hormigón), pero con cubiertas independientes en cada pórtico. La superficie de la nave TIPO es de 155m^2, destinada a recibir una gran variedad de actividades.

Nave TIPO:

Sumario

RESUMEN 1

SUMARIO 3

1 GLOSSARIO 7

2 PREFACIO 11

2.1 Origen del proyecto 11

2.2 Motivación 12

2.3 Requerimentos previos 12

3 INTRODUCCIÓN 15

3.1 Objectivos del proyecto 16

3.2 Abasto del proyecto 16

4 MODELOS DE CÁLCULO AVANZADO 19

4.1 Elementos constructivos de la nave 19

4.1.1 Elemento HEB220 con placas de hormigón encajadas 19

4.1.2 Generación de las placas de hormigón encajadas en el perfil HEB220 25

4.1.3 Anàlisis térmico del pilar HEB220 con placas de hormigón encajadas 25

4.1.4 Desplazamiento de la cabeza del pilar (aislado, sin estar encajado en las placas de hormigón) sin protección sometido a fuego ISO en una de sus caras 29

4.1.5 Análisis térmico de la viga armada que sustenta la placa alveolar 200+50 34

4.1.6 Análisis de “sensibilidad de la malla” 36

4.2 Protección para estructura metálica 40

4.2.1 Descripción 40

4.2.2 Características 40

4.2.3 Ensayos 41

4.2.4 Generación del mallado del conjunto pilar HEB220 + protección mortero Tecwool F de 30 mm de espesor 42

4.2.5 Análisis del desplazamiento de la cabeza del pilar HEB220 + protección mortero Tecwool F de 30mm. de espesor. 44

4.2.6 Análisis térmico de la viga armada que sustenta la placa alveolar 200+50 + protección mortero Tecwool F de 30 mm.de espesor. 46

4.3 Caracterización de los establecimientos industriales en relación con la seguridad contra incendios 47

4.3.1 Establecimiento 47

4.3.2 Características de los establecimientos industriales por su configuración y ubicación con relación a su entorno 47
4.3.3 Caracterización de los establecimientos industriales por su nivel de riesgo intrínseco.....49
4.4 Estabilidad al fuego de los elementos constructivos portantes 51
4.4.1 Para cubiertas ligeras de los edificios industriales de tipo A con medianerías 52
4.5 Análisis de la respuesta mecánica de la nave TIPO frente un incendio 54
4.5.1 Distribución de cargas en pórtico 54
4.6 Análisis de tres pórticos sometidos a fuego ISO 57
4.6.1 Análisis estático de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico intermedio, pilares y vigas protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor.....57
4.6.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico intermedio, pilares y viga armada protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 58
4.6.3 Análisis estático de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico de esquina, pilares y viga armada protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 59
4.6.4 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico de esquina, pilares y viga armada protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 60
4.7 Análisis de tres pórticos sometidos a fuego NATURAL.....61
4.7.1 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico intermedio, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor 62
4.7.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico intermedio, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor 63
4.7.3 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” en el pórtico de esquina, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor 64
4.7.4 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” en el pórtico de esquina, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor 65
4.8 Análisis de los tres pórticos según perfil Z de cubierta 66
4.8.1 Perfil Z de cubierta deslizante 66
4.8.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL en el pórtico intermedio con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor y con perfil Z deslizante. 67
4.8.3 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL en el pórtico de esquina con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor y con perfil Z deslizante 68

4.8.4 Análisis perfil Z deslizante con fuego NATURAL del caso “realista” en pórtico de esquina 69
4.8.5 Análisis perfil Z articulado con fuego NATURAL del caso “realista” en pórtico de esquina 70
4.9 Análisis de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” sin perfil Z en el sector de incendio 72
4.9.1 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” y sin perfil Z en el pórtico intermedio con vigas y pilares protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor. 72
4.9.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” y sin perfil Z en el pórtico de esquina con vigas y pilares protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor. 73
4.10 Análisis de la cubierta 74
4.10.1 Perfiles en Z y placas de poliéster 74
4.10.2 Análisis térmico del perfil Z de cubierta sometido a fuego ISO 75
4.10.3 Para-llamas de cubierta 77

5 MODELOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADO ____ 80

5.1 Cálculo estructural frente al fuego, modelos de cálculo simplificados 80
5.1.1 Generalidades 80
5.2 Determinación de la protección de la viga armada que sustenta el altillo (placa alveolar 200+50) 82
5.2.1 Dimensionado por resistencia 82
5.2.2 Cálculo de la protección al fuego 83
5.3 Comprobación de la capacidad portante del pilar HEB220 protegido, sometido a compresión 94
5.3.1 Datos del pilar HEB220 94
5.3.2 Comprobación de la resistencia del pilar en condiciones normales (q =20ºC) 96
5.3.3 Comprobación de la protección al fuego 99
5.3.4 Comprobación de la resistencia del pilar protegido a la temperatura alcanzada 102

CONCLUSIONES ____ 105

AGRADECIMIENTOS ____ 108

BIBLIOGRAFÍA ____ 109

Referencias bibliográficas 109
Bibliografía complementaria 110

ANEXOS ____ 112

Anexo A. Modelos de cálculo avanzado 112
A.1 Achivo.IN del pilar HEB220 sometido a fuego ISO en una de sus alas 112
A.2 Archivo.IN de la generación de las placas de hormigón + pilar HEB220 116
A.3 Archivo.IN del análisis estático de la respuesta mecánica de tres pórticos con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor con fuego NATURAL en el pórtico intermedio 120
A.4 Archivo.IN del análisis dinámico de la respuesta mecánica de tres pórticos con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor con fuego NATURAL en el pórtico intermedio 122
Anexo B. Modelos de cálculo simplificado 125
B.1 Campo de aplicación de la EN 1993 125
B.2 Campo de aplicación de la EN 1993-1-2 126
Anexo C. Impacto ambiental 127
C.1 Impacto ambiental accidental de un incendio 127
C.2 Extinción de Incendios 128
C.3 Evaluación medioambiental 129
C.4 Terminología básica 130
Anexo D. Gráficos 132
D.1 Gráficos temperatura - tiempo, temperatura - factor de sección 132
Anexo E. Análisis estático y dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL en un pórtico 134
E.1 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico de esquina con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 134
E.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico de esquina con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 135
E.3 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” en el pórtico intermedio con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 136
E.4 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” en el pórtico intermedio con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor 137
Anexo F. Presupuesto 138
F.1 Costes del proyecto 138

1 Glossario

Letras latinas

A_m/V	es el factor sección para elementos de acero sin protección [1/m];
A_m	es la superficie del elemento por unidad de longitud [m²/m];
A_p/V	es el factor de sección para elementos de acero protegidos mediante material de protección frente al fuego [1/m];
A_p	es la superficie pertinente del material de protección frente al fuego por unidad de longitud del elemento [m²/m];
c_a	es el calor específico del acero, dependiente de la temperatura [J/kgK];
c_p	es el calor específico del material de protección frente al fuego, independientemente de la temperatura [J/kgK];
d_p	es el espesor del material de protección frente al fuego [m];
EF	estabilidad al fuego según el RSCIEI (Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos industriales) [min];
f_y	la tensión de fluencia a 20 °C
$f_{y,q}$	la tensión de fluencia eficaz del acero a la temperatura elevada q_a ;
G_k	el valor característico de una acción permanente [KN/m];
$\dot{h}_{net}$	es el valor de cálculo del flujo neto de calor por unidad de superficie [W/m2];
K_1	factor de adaptación para distribuciones de temperatura no uniformes en la sección transversal;
K_2	factor de adaptación para distribuciones de temperatura no uniformes a lo largo de la viga.
k_{sh}	es el factor de corrección del efecto sombra;
$K_{y,q}$	coeficiente de reducción para la tensión de fluencia del acero a la temperatura del acero q_a alcanzada en el instante t.
$K_{E,q}$	coeficiente de reducción para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura del acero alcanzada q_a en el instante t.
l_{fi}	la longitud de pandeo de un pilar para la situación de fuego de cálculo[m];
$M_{fi,Ed}$	momento de cálculo del efecto de las acciones para la situación de fuego [kNm];
$M_{fi,t,Rd(t=0)}$	valor de cálculo del momento resistido para el instante t [kNm];
$M_{fi,q_{\max},R_d}$	el valor de cálculo del momento resistido de la sección transversal para una temperatura $q_{\max}$ [kNm];

$N_{b,Rd}$ el valor de cálculo de la resistencia a pandeo de un elemento de compresión en condiciones normales de temperatura [KN];

$N_{b,\ fi,t,Rd}$ el valor de cálculo de la resistencia a pandeo de un elemento de compresión para el instante *t* en situación de fuego accidental [KN];

N_{sd} la resistencia de cálculo de la sección transversal del elemento para el cálculo a temperatura ambiente [KN];

$N_{fi,Ed}$ la resistencia de cálculo para el instante *t* de un elemento traccionado o comprimido con una distribución no uniforme de temperatura a través de la sección transversal en situación de fuego accidental [KN];

$Q_{k,1}$ la carga variable principal [KN/m];

$q_{fi,d}$ la carga uniformemente repartida en caso de fuego accidental [KN/m];

R la resistencia al fuego según el RSCIEI (Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos industriales) [min];

V es el volumen del elemento por unidad de longitud [m³/m];

Letras griegas

Δl la expansión inducida por la temperatura [m];

Δt el intervalo de tiempo [segundos];

$\Delta q_{a,t}$ el incremento de temperatura de un elemento aislado de acero durante un intervalo de tiempo Δt para una distribución de temperatura uniforme en una sección transversal [ºC];

$\Delta q_{g,t}$ es el incremento de la temperatura del gas ambiental durante el intervalo de tiempo Δt [K];

a el coeficiente de imperfección elástica que representa la sensibilidad al fenómeno de pandeo dependiendo del tipo de sección, plano de pandeo y tipo de acero;

g_G el factor parcial para acciones permanentes;

$g_{Q,1}$ el factor parcial para la acción variable principal;

g_{M1} el factor parcial a temperatura ambiente;

$g_{M,fi}$ el factor parcial para la propiedad del material pertinente en situación de incendio.

h_{fi} el coeficiente de reducción para el valor de cálculo del nivel de la carga en situación de incendio;

q_a la temperatura del acero [ºC];

$q_{a,cr}$	es la temperatura crítica del acero [ºC];
$q_{a,t}$	es la temperatura del acero en el instante *t* [°C];
$q_{g,t}$	es la temperatura del gas ambiental para el instante *t* [ºC];
$q_{\max}$	es la temperatura alcanzada por el elemento de acero al cabo de un instante t [ºC];
l_p	es la conductividad térmica del sistema de protección frente al fuego [W/mK];
$\overline{l}_Y$	es la esbeltez reducida debida al pandeo según eje Y;
$\overline{l}_q$	es la esbeltez reducida a la temperatura $q_{\max}$ alcanzada por el elemento de acero;
m_0	el grado de utilización para el instante *t* = 0.
r_a	es la densidad del acero, dada en el apartado 3 [kg/m3];
r_p	es la densidad del material de protección frente al fuego [kg/m3].
c_{fi}	el coeficiente de reducción para el pandeo a flexión en situación de fuego de cálculo;
c_Y	el coeficiente de reducción por pandeo, para valores de esbeltez reducida $\overline{l}_Y \geq 0.2$ en condiciones normales de temperatura;
$y_{fi} = y_1$	el factor de combinación para valores frecuentes, obtenido de $y_{1,1}$ o de $y_{2,1}$;

2 Prefacio

La circunstancia histórica que ha motivado este proyecto es un estudio reciente del Centro Tecnológico LABEIN Tecnalia, concluye que las naves de PRADO TM son seguras frente a un posible incendio en lo que respecta a su estabilidad estructural.
El estudio se ha llevado a cabo sobre una nave PRADO sometida tanto a fuego ISO como a fuego NATURAL, empleando métodos de cálculo avanzado y teniendo en cuenta las particularidades del diseño del sistema constructivo de PRADO.

Prado TM somete sus estructuras a pruebas de resistencia al fuego. Demuestran la seguridad de las naves Prado TM ante incendios [3].

La empresa se ha sometido a este análisis con el objetivo de conocer el comportamiento real del fuego sobre sus estructuras, ejerciendo su responsabilidad como empresa líder en el sector y yendo más allá del estricto cumplimiento de las normativas vigentes.

El estudio tiene un triple objetivo: en primer lugar, determinar la seguridad de las naves; en segundo, establecer la necesidad, en su caso, de proteger los elementos estructurales y en tercer lugar, detectar posibles zonas críticas, con el fin de introducir las mejoras necesarias para optimizar el comportamiento de las estructuras en caso de incendio.

2.1 Origen del proyecto

Este proyecto fue propuesto por el profesor Frederic Marimon Carvajal del Laboratorio de Resistencia de Materiales y Ingeniería de las Estructuras. El objetivo principal de este proyecto es la determinación del comportamiento termo-mecánico de la estructura metálica de una nave industrial TIPO frente a un incendio real.

El proyecto consiste en realizar un estudio ISAI (Ingeniería de Seguridad ante Incendio) donde se analiza la estructura de la nave teniendo en cuenta su tipología, dimensiones, cargas mecánicas, evolución de las cargas térmicas, etc. Esto hace que los resultados obtenidos en este proyecto a partir del estudio realizado mediante modelos de cálculo avanzado (programa SAFIR2004) y modelos de cálculo simplificado (Eurocódigo 3, parte 1-2: Estructuras expuestas al fuego) correspondan con el comportamiento ante el fuego

de una nave TIPO diseñada, fabricada y montada con un determinado sistema constructivo.

2.2 Motivación

PRADO TRANSFORMADOS METÁLICOS S.A. [4] ha recurrido a un centro tecnológico de reconocido prestigio, LABEIN Tecnalia, que ha realizado un estudio de seguridad ante incendio de una nave PRADO mediante el uso de avanzados métodos basados en ISAI (Ingeniería de Seguridad ante Incendio). Los resultados que se obtienen en este proyecto son posibles mediante programas de cálculo avanzado como SAFIRWIZARD, SAFIR 2004 Y DIAMOND 2004.

Este proyecto se sitúa en el reciente campo de la ingeniería de la seguridad ante incendios y que actualmente se encuentra en plena expansión. Este proyecto es una investigación real sobre el análisis del comportamiento termo-mecánico de la estructura metálica de una nave TIPO intentando conseguir que dicha nave sea segura frente a un incendio.

2.3 Requerimentos previos

Tener conocimientos sobre:

- Estructuras y construcciones industriales.
- El método de elementos finitos, teoría del programa SAFIR2002 programa para el análisis de estructuras sometidas a fuego [5].
- La utilización del manual del programa SAFIR2004 [6] (calcula el análisis térmico y mecánico de la estructura metálica de la nave).
- La utilización del programa WIZARD (para introducir vigas y pilares mediante elementos finitos).
- La utilización del programa DIAMOND2004 (da resultados gráficos del desplazamiento del pórtico o de la distribución de temperaturas los elementos constructivos de la nave).
- Norma Europea Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, parte 1.2 : Estructuras expuestas al fuego.
- Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSIEI).
- La utilización del programa ELEFIR EN V1.0 (para obtener la resistencia al fuego de un elemento de acero).

- La utilización del programa CLASE (para obtener la clase de sección de un determinado perfil metálico y sus características mecánicas de la sección bruta y eficaz).

3 Introducción

Uno de los elementos más destructivos para una nave industrial, es EL FUEGO. Las normas nacionales e internacionales de la Edificación exigen unos requisitos de protección contra incendios que los establecimientos industriales deben cumplir. Se contemplan dos clases de protección contra incendios: La protección activa, la que apaga el fuego ya producido, y la PROTECCIÓN PASIVA, que evita que se produzca o minimiza sus efectos.

Los elementos de protección pasiva contra incendios son elementos constructivos o materiales añadidos a los elementos constructivos, que cumplen una múltiple función: evitar que el fuego se inicie, evitar que se propague, facilitar la evacuación de las personas, facilitar la extinción del fuego. Ésto se consigue con sistemas de sectorización y protegiendo las estructuras portantes de la nave industrial para evitar su colapso y derrumbe.

Los revestimientos para la protección pasiva contra incendios deben estar ensayados y certificados por Laboratorios acreditados en esta especialidad, para poder ser utilizados en los establecimientos industriales.

La metodología utilizada para obtener resultados de la estabilidad al fuego de la nave TIPO y de sus elementos constructivos son modelos de cálculo avanzado según el método de elementos finitos. Se utiliza para el estudio el preprocesador SAFIRWIZARD, el procesador SAFIR2004 y el postprocesador DIAMOND2004.

Otra metodología utilizada son los modelos de cálculo simplificado que nos permitirán realizar cálculos de la resistencia al fuego y determinar el espesor del material de protección al fuego de los elementos individuales que constituyen la nave como vigas y pilares, estos cálculos se fundamentan en hipótesis conservadoras, en el Eurocódigo 3 [1].

El Centro Tecnológico LABEIN Tecnalia, que concluye que las naves de PRADO TM son seguras frente un incendio, es pionero en el conocimiento y la utilización de ISAI y ha participado en la redacción del Reglamento de Seguridad contra Incendios en los

Establecimientos Industriales (RSIEI) y en el nuevo Código Técnico de Edificación (CTE) [7].

3.1 Objectivos del proyecto

El estudio de este proyecto consiste en analizar el comportamiento termo-mecánico de la estructura metálica de una nave TIPO sometida a la acción del fuego ISO y del fuego NATURAL mediante modelos de cálculo avanzado (SAFIR2004) [6] y en realizar un cálculo estructural frente al fuego ISO de una nave TIPO mediante modelos de cálculo simplificado ("cálculo manual" según Eurocódigo 3 Parte 1-2) [1]. Este proyecto tiene un doble objetivo: en primer lugar, determinar la seguridad de la nave; en segundo, establecer la necesidad, en su caso, de proteger los elementos estructurales e introducir las mejoras necesarias para optimizar el comportamiento de la estructura metálica en caso de incendio.

La nave TIPO está constituida por unos elementos constructivos determinados, dichos elementos son vigas y pilares de acero que pueden estar sin protección o bien aislados mediante materiales de protección. Para determinar la estabilidad y resistencia al fuego de la nave y de sus elementos constructivos se realizan los siguientes métodos de cálculo:

- Los modelos de cálculo avanzados son métodos de cálculo en los cuales se aplican principios de ingeniería a aplicaciones específicas de una manera realista.
- Los modelos de cálculo simplificados son métodos de cálculo simplificados para elementos individuales, los cuales se fundamentan en hipótesis conservadoras.

3.2 Abasto del proyecto

El estudio se ha realizado ante dos escenarios de incendio teniendo en cuenta sus particularidades. En un primer escenario se calcula **la estructura completa** de tres pórticos de la nave TIPO **sometida a Fuego Estándar ISO** según RSIEI, y en el segundo escenario se **calcula la estructura completa sometida a "Fuego Natural"**, para conocer de forma más realista el comportamiento de la estructura de la nave, teniendo en cuenta las características definidas por el riesgo del establecimiento industrial y siguiendo los conceptos desarrollados en el proyecto europeo "Natural FIRE Safety Concepts", recogidos también en los Eurocódigos.

SAFIR2004 es un programa de computadora que permite el análisis de estructuras bajo condiciones de temperatura elevadas y de temperatura ambiente. El programa se basa en el método de elementos finitos (MEF), se puede utilizar para estudiar el comportamiento de estructuras dimensionales o tridimensionales o bien el comportamiento de una sección de un determinado perfil metálico. El programa SAFIR2004 fue desarrollado en la Universidad de Lieja, Bélgica. Como programa de elementos finitos SAFIR acomoda varios elementos: sólidos 2-D, sólidos 3-D, elementos viga, elementos lámina o elementos barra que pueden ser de acero o de una material concreto que el usuario del programa puede definir.

El análisis de una estructura expuesta al fuego puede consistir en varios pasos. El primer paso implica el predecir la distribución de la temperatura dentro de los miembros estructurales de la nave TIPO objeto de este estudio, es decir, predecir su análisis térmico. El análisis torsional puede ser necesario para elementos viga 3-D. El segundo paso consiste en realizar el análisis estructural con el propósito principal de determinar la respuesta de la estructura debido a al cargamento estático y térmico, permite ver el desplazamiento o dislocación en cada nodo de la estructura, las fuerzas axiles y momentos de flexión en los puntos de integración en cada elemento finito. Para realizar este análisis estructural es necesario realizar una discretización por elementos finitos del pórtico de la nave con sus correspondientes nodos. Hay que destacar que una vez la nave empieza a someterse a un incendio las temperaturas en una sección de una viga o pilar no son temperaturas uniformes y según SAFIR2004 no hay traspaso térmico a lo largo del eje de las vigas o pilares.

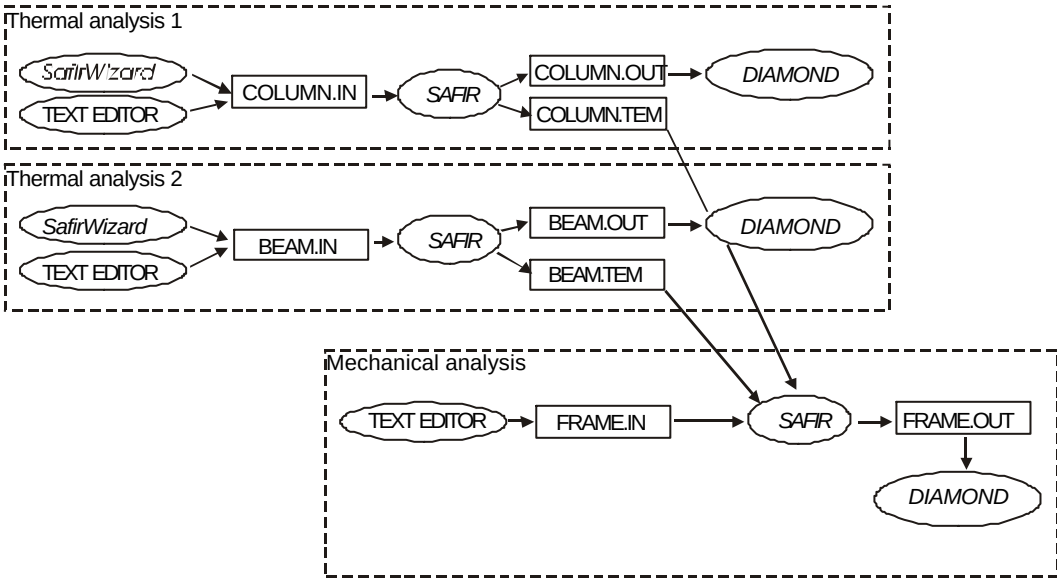
Características del programa SAFIR2004:

- Con Safir2004 se puede observar la respuesta de una estructura debido a la carga estática y térmica.
- Para cada elemento estructural de la nave su sección transversal se discretiza por elementos finitos con sus respectivos nodos. Para el análisis se usan elementos sólidos 2D.
- Archivos y pasos para generar perfiles metálicos (vigas y pilares):
- Archivo.IN se crea con SAFIRWIZARD, se generan nodos y elementos finitos de la sección transversal del perfil considerado.

- Archivo.IN se introduce en el programa SAFIR y se genera el archivo.OUT y el archivo.TEM.
- Archivo.OUT da resultados gráficos de la temperatura en cada nodo del elemento estructural para un tiempo determinado.
- Archivo.TEM da listado de la temperatura del acero en cada nodo en determinados instantes de tiempo.

• Archivos y pasos para generar estructura de la nave (pórtico):

- Archivo.IN se crea el pórtico de la nave con un editor de texto. Se crean los correspondientes elementos finitos, cada uno de ellos con 3 nodos, los de los extremos con tres grados de libertad y el nodo intermedio con un grado de libertad.
- Archivo.IN se introduce en el programa SAFIR y se genera el archivo.OUT que nos permite ver el desplazamiento que sufre la estructura de la nave en diferentes instantes de tiempo, también dará el tiempo en que se colapsa y derrumba la estructura.
- Para cada viga y pilar de la nave se introduce en el archivo.IN creado con el editor de texto el correspondiente archivo.TEM, que nos da la distribución de temperaturas en cada nodo de la sección de esa viga o pilar una vez se ha sometido a fuego dicha sección.



4 Modelos de cálculo avanzado

Son métodos de cálculo en los cuales se aplican principios de ingeniería a aplicaciones específicas de una manera realista. En este proyecto se utilizan modelos de cálculo avanzado según el método de elementos finitos mediante el programa SAFIR2004, para utilizarlos ha sido necesario tener conocimiento de la teoría de SAFIR [5] y del manual del programa [6].

4.1 Elementos constructivos de la nave

La estructura del pórtico de la nave TIPO está formada por dos pilares HEB220 cada uno de ellos encajados en placas de hormigón, una viga armada que sustenta un altillo (placa alveolar 200+50) y una viga metálica que es un perfil Z en la cubierta.

Dimensiones HEB220:

Altura: h=220mm

Longitud del ala: b=220mm

Espesor del alma: t_w=10mm

Espesor del ala: t_f=16mm

Radio de soldadura: r=18mm

Dimensiones VIGA ARMADA:

Altura: h=645mm

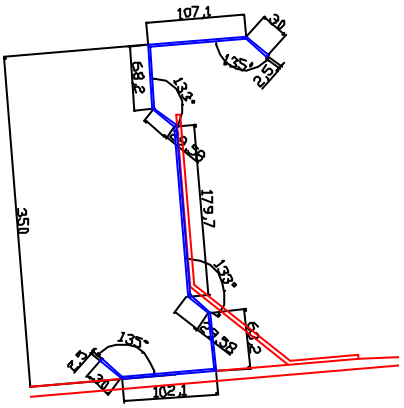
Longitud del ala: b=300mm

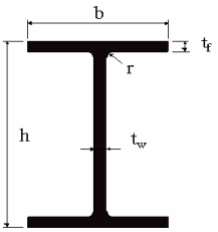
Espesor del alma: t_w=6mm

Espesor del ala: t_f=15mm

Radio de soldadura: r=4.2mm

Dimensiones perfil en Z de cubierta en pilares HEB220 y viga armada:



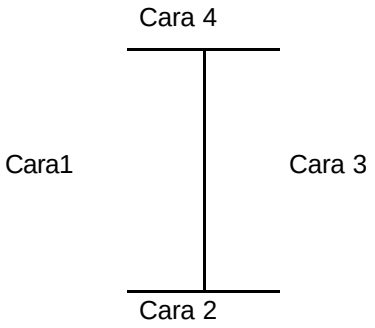


4.1.1 Elemento HEB220 con placas de hormigón encajadas

En la nave industrial TIPO los pilares HEB220 se encajan en placas de hormigón. A este elemento constructivo se le puede hacer una aproximación, el perfil tendrá dos caras

adiabáticas, el calor transmitido a través del alma del HEB220 se considera nulo, debido a las dos placas de hormigón que se encajan en cada cara del alma (caras 1 y 3) y en las otras dos caras interiores de las alas del perfil (cara 2 interior y cara 4 interior).

Número de las caras del elemento:



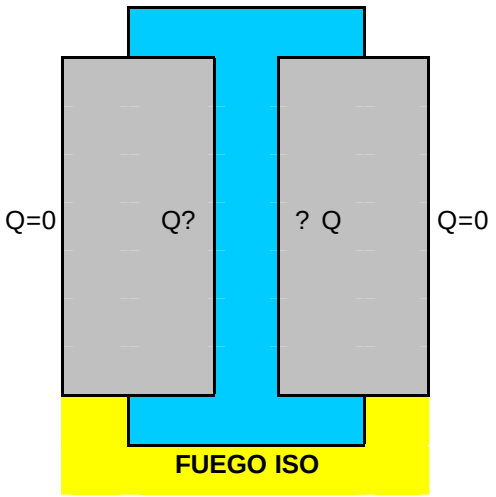
Modificando en archivo HE220B_01.IN (perfil HEB220 sometido a fuego ISO en todo su contorno) se consiguen que las dos caras del alma y caras interiores de las alas sean adiabáticas, no haya transmisión de calor (Q=0). También hay que considerar que la cara 4 exterior del perfil está sometida a temperatura ambiente de 20ºC (según SAFIR 2004 a F20).

Con el programa WIZARD introducimos la siguiente discretización del perfil HEB220 por elementos finitos:
Número elementos del perfil: 134
Número de nodos del elemento: 198
Sometido a fuego: ISO
Material del elemento: STEELEC3 (acero de características según el Eurocódigo 3)

En el siguiente gráfico se puede observar que la cara 4 está sometida a temperatura ambiente de 20ºC, mientras que la cara 2 está expuesta a fuego ISO y las caras interiores de las alas y el alma del perfil se ha considerado que son superficies adiabáticas (Q=0, calor transmitido se considera que es nulo). Posteriormente se comprueba que esta aproximación sea correcta pues puede que a través de las placas de hormigón se transmita calor hacia el alma del perfil, sabiendo que los extremos de la placa de hormigón si que serán superficies adiabáticas. Por ello se crea un nuevo archivo.IN generando las placas de hormigón que se encajan en el perfil HEB220.

Se realiza esta aproximación de superficies adiabáticas ya que se tiene que asegurar la resistencia y estabilidad al fuego ya que las placas de hormigón tienen que ser un buen aislante térmico, asegurando que la temperatura de la cara 4 del perfil HEB220 sea aproximadamente de 140º.

Flujo de calor a través de las placas de hormigón encajadas en HEB220:



El programa SAFIR2004 considera: “FISO” = 20 + 345 $\log_{10}$ (8 *t* / 60 + 1) con t en seg.

Elemento HEB220 sin protección, considerando superficies adiabáticas las caras interiores de las alas y caras interiores del alma, ya que dicho pilar HEB220 está encajado en placas de hormigón de 160mm de espesor:

Número de elementos del perfil: 134

Número de nodos del elemento: 198

Sometido a fuego: ISO en la cara 2

Sometido a temperatura ambiente: 20ºC en la cara 4

Material del elemento: STEELEC3 (acero según el Eurocódigo 3)

Gráfico obtenido con el programa DIAMOND a partir del archivo.OUT generado por SAFIR2004, programa que realiza el cálculo térmico del perfil HEB220. A continuación se dan gráficos mediante el programa DIAMOND que nos permiten observar la discretización por elementos finitos y la distribución de temperaturas en todos los nodos del perfil para diferentes instantes de tiempo.

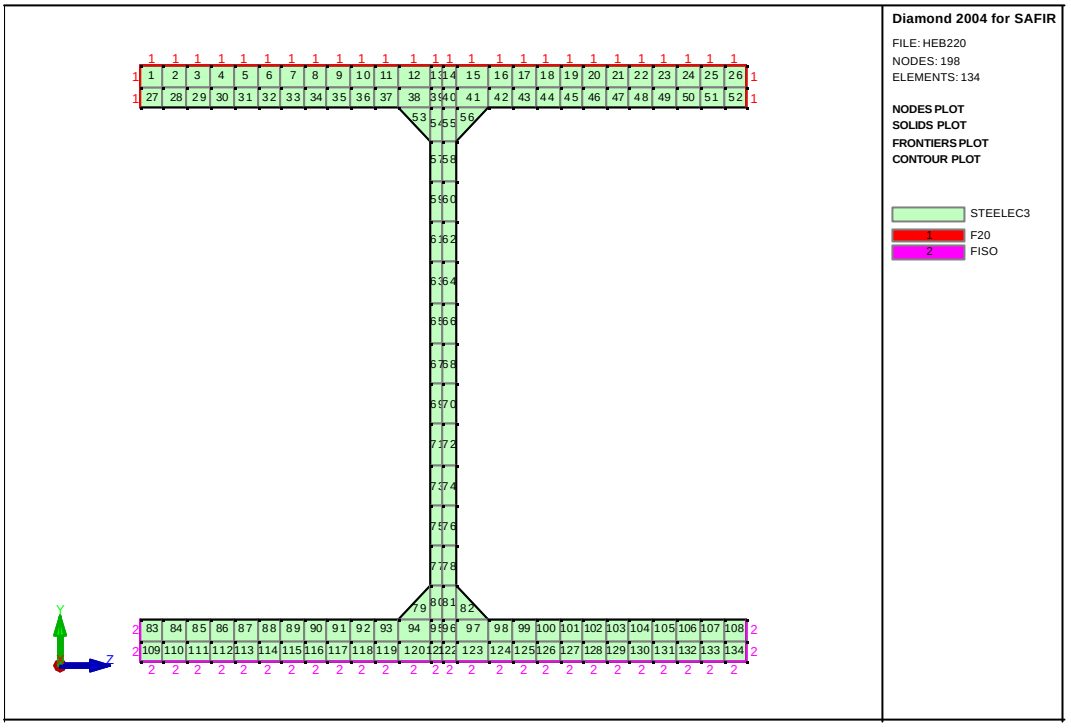


Fig.4-1 Pilar HEB220 expuesto a fuego ISO con 198 nodos y 134 elementos finitos.

Mediante el programa SAFIR2004 se obtiene el gráfico de la distribución de temperaturas del pilar HEB220 expuesto a fuego ISO en una de sus caras desde un instante inicial hasta los 3600s, considerando paredes interiores adiabáticas, puesto que existe un incendio localizado en una área concreta de la nave TIPO.

Todos estos gráficos se realizan dentro de un margen de temperaturas, se grafica la distribución de temperaturas con una temperatura mínima de 200ºC y una temperatura máxima de 800ºC.

El programa DIAMOND2004 te permite graficar resultados dentro de un margen de temperaturas a elegir:
Options>Temperaturas>Numbers of colors 14>User>Min temp 200>Max temp 800 por ejemplo.

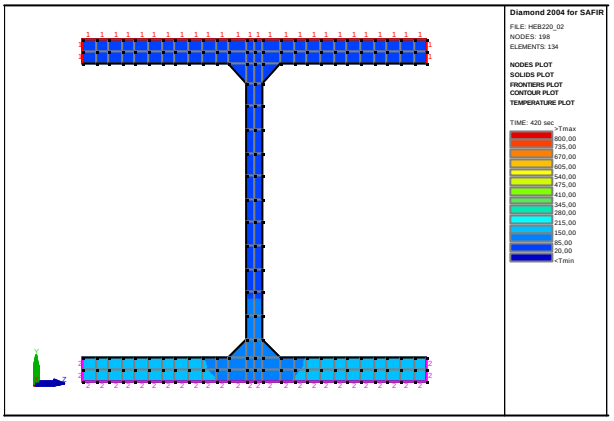


Fig. 4-2 Pilar HEB220 sin protección expuesto a fuego ISO a los 420s.

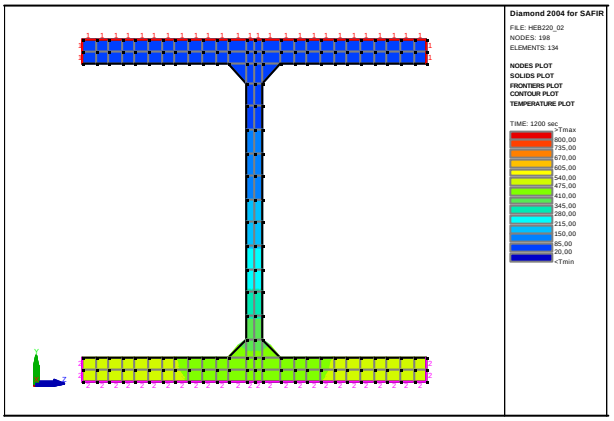


Fig.4-3 Pilar HEB220 sin protección expuesto a fuego ISO a los 1200s.

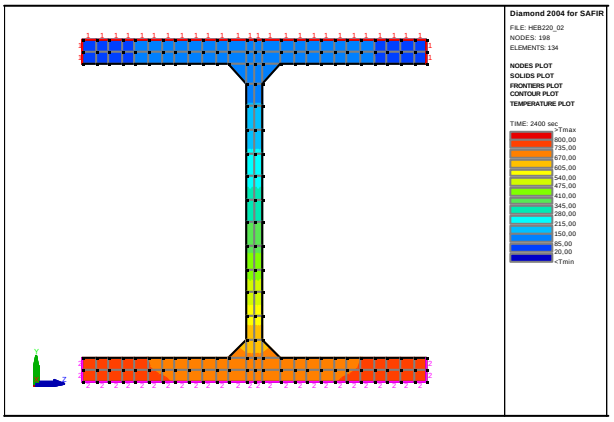


Fig.4-4 Pilar HEB220 sin protección expuesto a fuego ISO a los 2400s.

Al cabo de una hora si tiene la distribución de temperaturas de la **Fig.4-4** en cada uno de los nodos del perfil.

El color naranja oscuro nos indica que después de 2400s de exposición a fuego ISO la mayoría de los elementos del perfil que están en contacto con el fuego están a temperatura entre 735ºC y 800ºC.

El color naranja claro nos indica que después de 2400s de exposición del perfil a fuego ISO unos cuantos elementos están a temperatura entre 670ºC y 735ºC.

El archivo HE220B_01.IN se abre dentro del programa SAFIR 2004 el cual realiza el cálculo del análisis térmico del perfil HEB220, creándose el archivo HE220B_01.OUT y el archivo HE220B_01.TEM

Elemento sin protección:
Número de elementos del perfil: 134
Número de nodos del elemento: 198
Sometido a fuego: ISO
Material del elemento: STEELEC3 (acero según el Eurocódigo 3)

Se observa que el perfil tiene mayor resistencia y estabilidad a fuego ISO si se consideran las caras interiores de las alas y del alma como superficies adiabáticas, (hipótesis que se realiza ya que se encajan placas de hormigón en el pilar).

Si se decide graficar la distribución de temperaturas entre 150ºC y 850ºC del perfil HEB220 sometido a fuego ISO durante 3600s se obtiene el siguiente gráfico.

En el se observa que es necesario proteger las alas del perfil puesto que se llega a una temperatura de 906.10ºC. El gráfico de temperaturas se realiza entre 150ºC y 850ºC($q_i = 150$ºC, $q_s = 850$ºC).

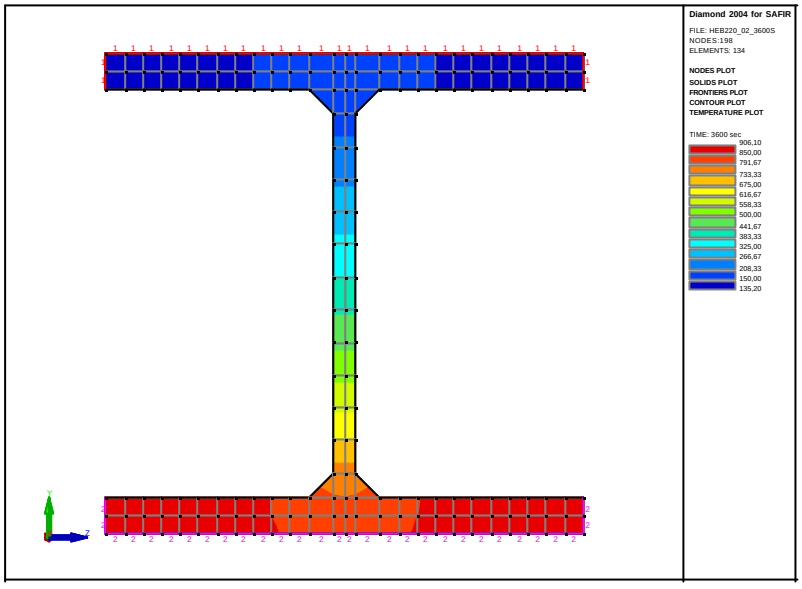


Fig.4-5 Pilar HEB220 sin protección expuesto a fuego ISO a los 3600s.

4.1.2 Generación de las placas de hormigón encajadas en el perfil HEB220

Se genera la placa de hormigón con el programa Excel para poder introducir los nuevos elementos finitos de las placas de hormigón a partir de ciertas modificaciones en el archivo HE220B_01.IN para generar :

Placa derecha de hormigón:

- del elemento 135 al elemento 362
- del nodo199 al nodo 458

Placa izquierda de hormigón:

- del elemento 363 al elemento 590
- del nodo 459 al nodo 718

4.1.3 Anàlisis térmico del pilar HEB220 con placas de hormigón encajadas

Gracias a la generación de los nodos de las placas de hormigón que se encajan al pilar HEB220 mediante el programa Excel se puede realizar un análisis térmico del conjunto pilar + placas de hormigón y observar si la hipótesis inicial en la que se consideran paredes adiabáticas interiores es correcta.

En pilar + placas de hormigón sometidas a fuego ISO por una cara el gráfico de temperaturas se realiza entre 150ºC y 850ºC ($q_i = 150$ºC, $q_s = 850$ºC) durante 3600s.

Material HEB220: STEELEC3 (Acero según Eurocódigo 3)
Material placas de hormigón: SILCONCEC2 (Hormigón armado)

Mediante el programa Excel se generan los nodos de coordenadas Y y Z de las placas de hormigón se genera el conjunto pilar más placas de hormigón.

Para ver si la hipótesis de paredes interiores son adiabáticas es correcta se realiza el estudio comparativo de la temperatura en los nodos 43, 97, 146, 160 y 170 de la discretización por elementos finitos.

El nodo 97 es del lado izquierdo del alma de perfil HEB220, el nodo 43 es del ala que está sometida a temperatura ambiente y los nodos 146,160 y 170 son nodos interiores del ala del perfil sometida a fuego ISO.

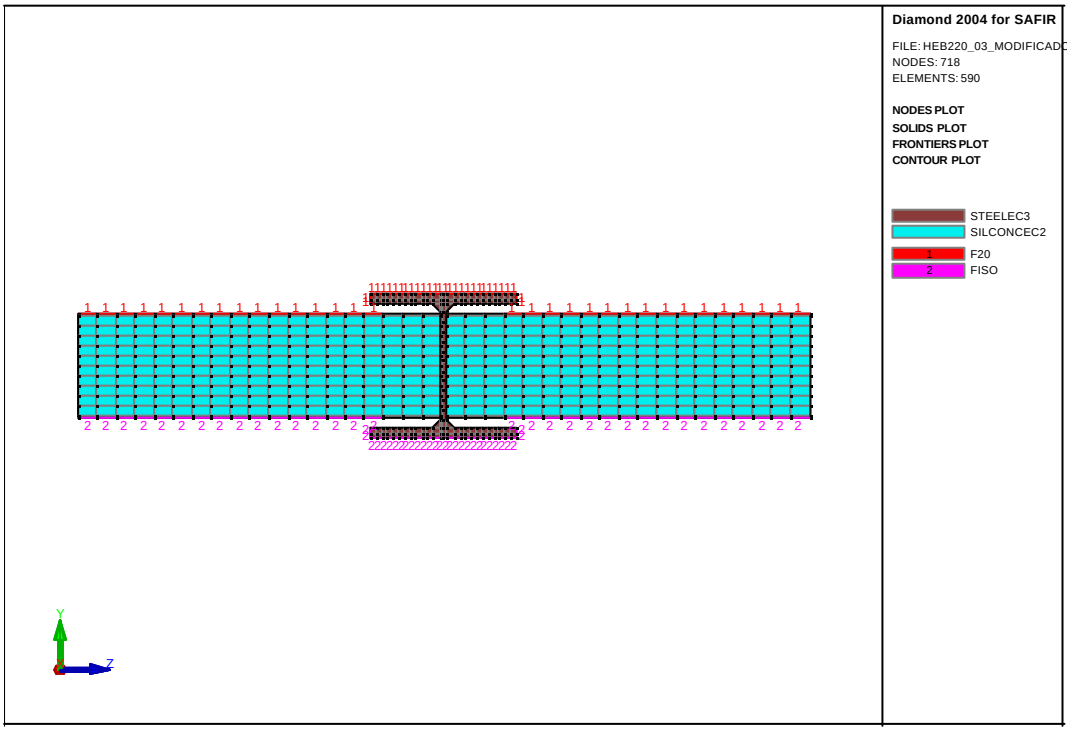


Fig.4-6 Pilar + placas de hormigón con 718 nodos y 590 elementos finitos.

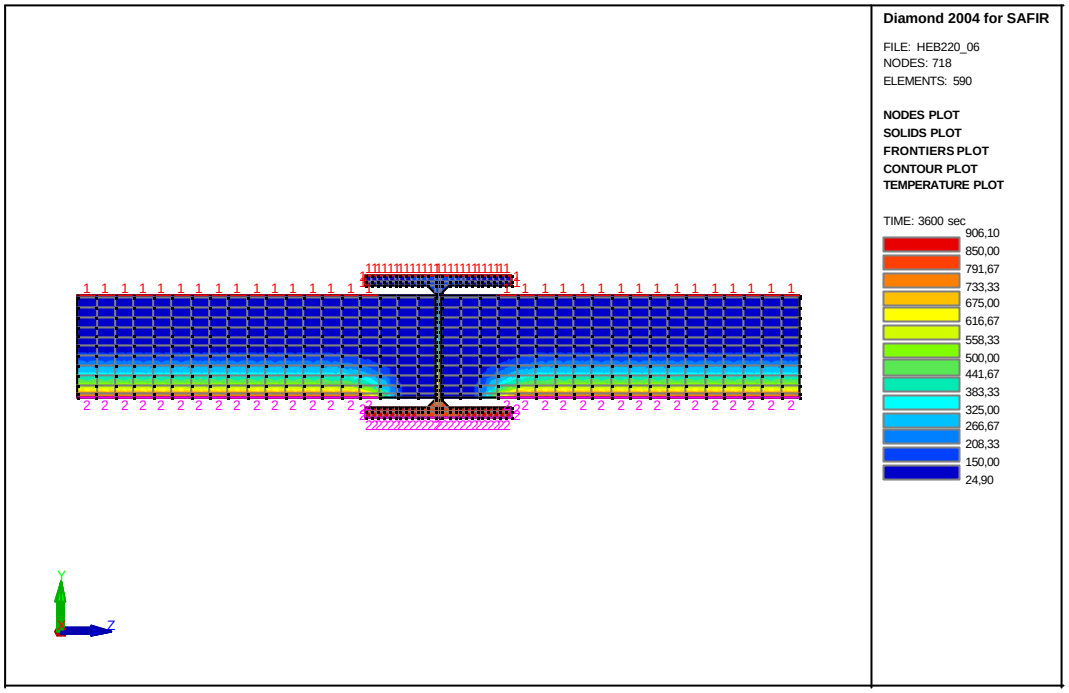


Fig.4-7 Pilar+placas de hormigón sometidas a fuego ISO por una cara a los 3600s.

Se observa que la temperatura máxima alcanzada en lado que está sometido a fuego ISO es de 906.10ºC.

Con el programa DIAMOND se ha obtenido el gráfico de la distribución de temperaturas del pilar+placas sometidos a fuego ISO por una cara. Se realiza el gráfico de temperaturas entre 150ºC y 850ºC($q_i = 150$ºC, $q_s = 850$ºC) para poder comparar los resultados del caso pilar+placas con el caso de pilar con caras interiores adiabáticas.

A continuación con el programa DIAMOND se obtienen los siguientes gráficos de temperatura-tiempo , nos indican la temperatura alcanzada en cada nodo en un determinado instante de tiempo.

Se observa que puede ser necesario proteger el pilar posteriormente, por tanto se realizará una discretización por elementos finitos de la estructura pilar HEB220 + placas de hormigón + protección. Dicha protección será de un material en concreto con unas características determinadas.

Se realizan los gráficos de temperatura-tiempo del conjunto pilar HEB220 + placas de hormigón y del pilar HEB220 con caras interiores adiabáticas. A partir de estos gráficos obtenidos mediante el programa DIAMOND2004 se puede observar que la hipótesis realizada anteriormente en que se consideraban las paredes interiores adiabáticas es correcta, puesto que al generar la distribución de temperaturas del conjunto pilar más placas de hormigón en los nodos 43, 97, 146, 160, 170 se obtiene la misma temperatura que en el caso del pilar con caras interiores adiabáticas.

Se concluye que la hipótesis inicial de que las paredes interiores son adiabáticas es correcta.

Con el programa DIAMOND se obtienen los siguientes resultados gráficos una vez SAFIR2004 ya ha realizado el correspondiente análisis térmico.

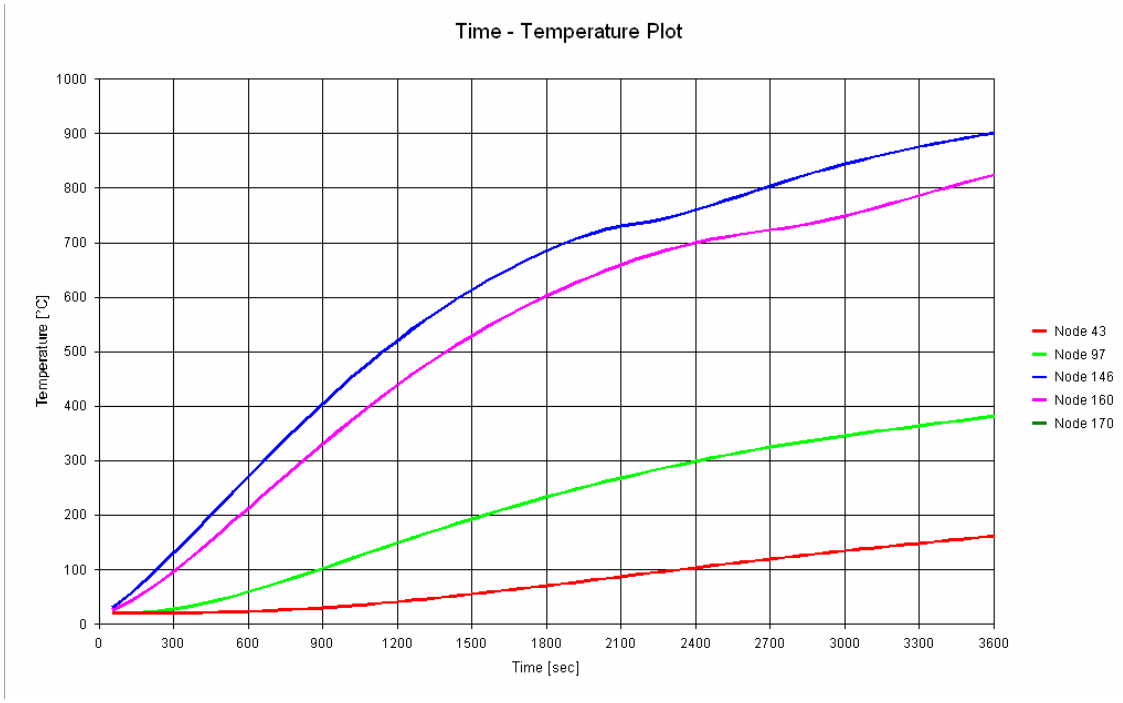


Fig.4-8 Gráfico temperatura-tiempo del pilar HEB220+placas de hormigón.

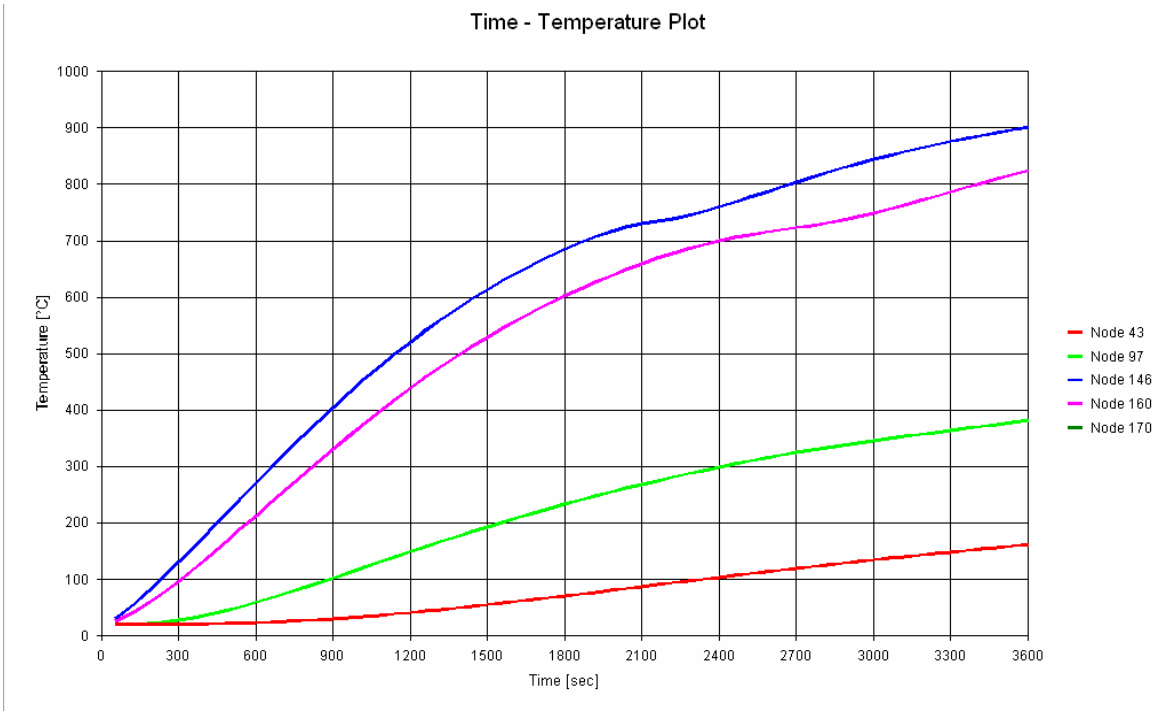


Fig.4-9 Gráfico del pilar HEB220 con caras interiores adiabáticas.

4.1.4 Desplazamiento de la cabeza del pilar (aislado, sin estar encajado en las placas de hormigón) sin protección sometido a fuego ISO en una de sus caras

Altura del pilar HEB220: 9.257 m.
Número de elementos del pilar HEB220: 10

A continuación se ha realizado un archivo.IN creando un discretización por elementos finitos del pilar HEB220 con paredes adiabáticas interiores. Ésta consta de 10 elementos finitos y 21 nodos.

El archivo.IN, que tendrá en cuenta el archivo.TEM del pilar HEB220, se introduce en el programa SAFIR2004 que realizará el cálculo del desplazamiento de cada uno de los nodos, se observará concretamente cual es el desplazamiento de la cabeza del pilar.

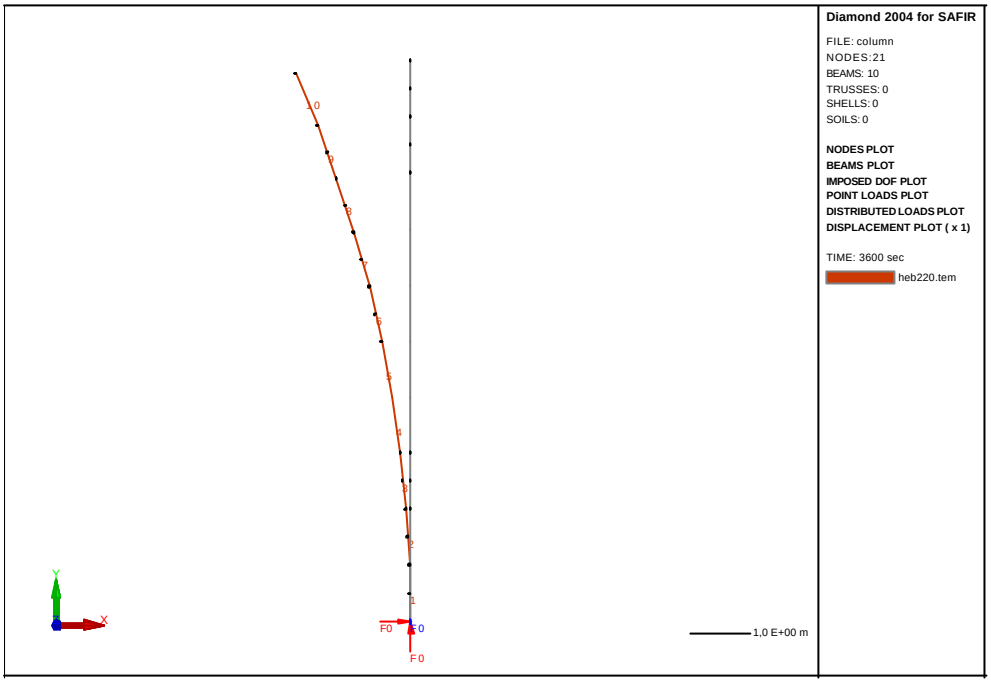


Fig.4-10 Gráfico desplazamiento de la cabeza del pilar HEB220 con caras interiores adiabáticas y sin protección sometido a fuego ISO en una de sus caras.

Una vez realizado el cálculo por el programa SAFIR2004 se obtienen el archivo.OUT que nos permitirá ver resultados gráficos del desplazamiento del pilar **Fig.4-10**

Se realiza una comparación entre los resultados gráficos obtenidos y la estimación teórica del desplazamiento de la cabeza del pilar con caras interiores adiabáticas.

El pilar se discretiza por 21 nodos y 10 beams (elementos para discretizar por elementos finitos vigas o pilares según SAFIR2004).

Desplazamiento horizontal w de los nodos 1, 13 y 21 del pilar HEB220

	Node 1	C2	Node 13	C4	Node 21	C6
R1	5	0	5	-0,00071	5	-0,00197
R2	10	0	10	-0,00142	10	-0,00393
...						
R227	3584	0	3584	-0,68794	3584	-1,89364
R228	3600	0	3600	-0,68858	3600	-1,89538

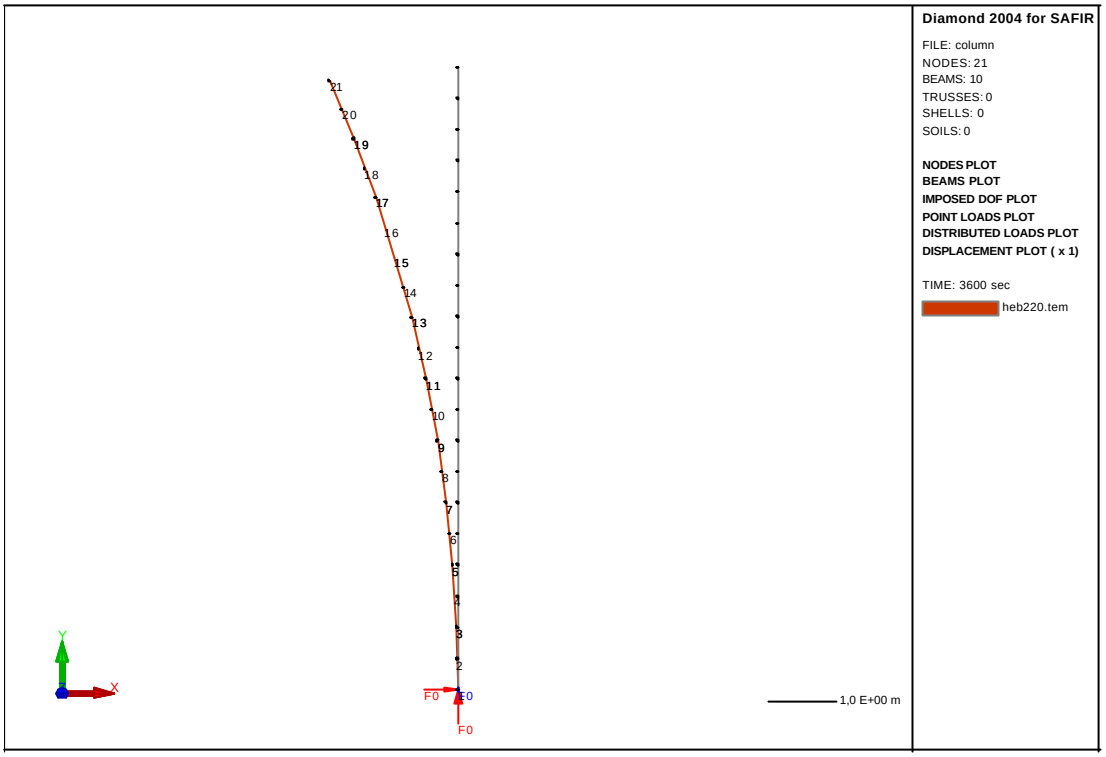


Fig.4-11 Gráfico nodos desplazados del pilar HEB220 con caras interiores adiabáticas y sin protección sometido a fuego ISO en una de sus caras.

A los 3600s el nodo 21 del extremo del pilar HEB220 tiene un desplazamiento según el eje X de -1.89538 m., el nodo 1 no se desplaza al estar empotrado y el nodo 13 por ejemplo se ha desplazado -0.68858m. según el eje X.

Para el pilar HEB220 sometido a fuego ISO durante 3600s se tiene que:

h=0.22m (anchura), L= 9.257m (altura), $q_i = 150$ºC, $q_s = 850$ºC, $a = 1.33 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{o}C}$

<u>El coeficiente de dilatación térmica del acero:</u>

(según EN 1993-1-2:2005 [1] figura 3.3 deformación térmica unitaria del acero al carbono en función de la temperatura)

$$a = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{(q_a - 20^{o}C)} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{600} = 1.33 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{o}C}$$

Para este perfil HEB220 se calcula una estimación teórica del desplazamiento de la cabeza del pilar:

El desplazamiento horizontal w:

$$w = a \cdot \frac{q_s - q_i}{h} \cdot \frac{L^2}{2} = 1.33 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{850-150}{0.22} \cdot \frac{9.257^2}{2} = 1.82m \cong 1.89538m$$ resulltado

obtenido con el programa DIAMOND.

El desplazamiento vertical u:

Este desplazamiento se considera como acortamiento del pilar sin tener en cuenta la desplazamiento horizontal.

$$u = a \cdot \left[\frac{q_s + q_i}{2} - 20\right] \cdot L = 1.33 \cdot 10^{-5} \cdot \left[\frac{850+150}{2} - 20\right] \cdot 9.257 = 0.059m$$

El giro acumulado j :

$$j = a \cdot \frac{q_s - q_i}{h} \cdot L = 1.33 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{(850-150)}{0.22} \cdot 9.257 = 0.39rad \approx 22^{o}C \cong 0.41287rad$$

resultado obtenido con el programa DIAMOND.

Los resultados obtenidos con el programa DIAMOND para los nodos 1,13 y 21 del pilar HEB220 sin proteger son:

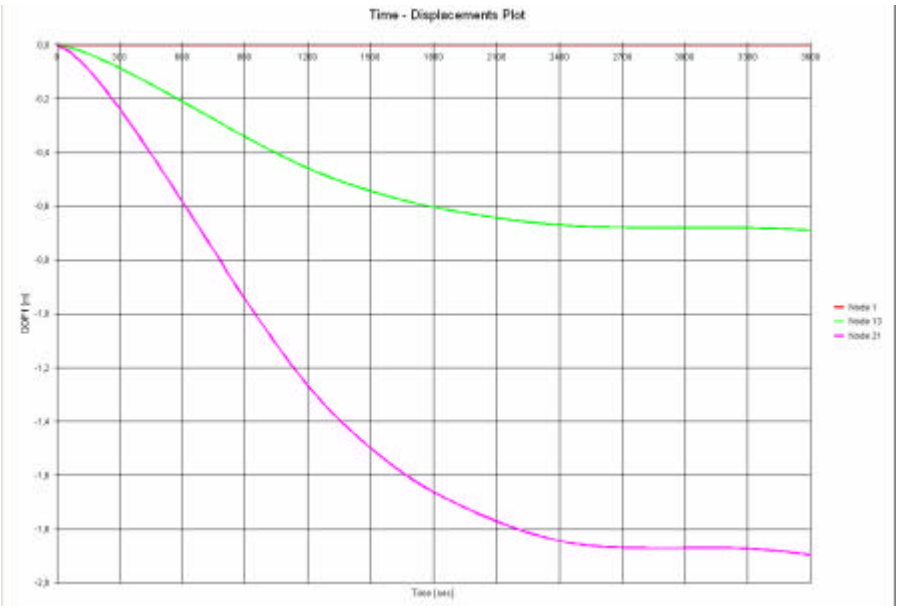


Fig.4-12 Gráfico del tiempo - desplazamiento horizontal w para los nodos 1, 13 y 21

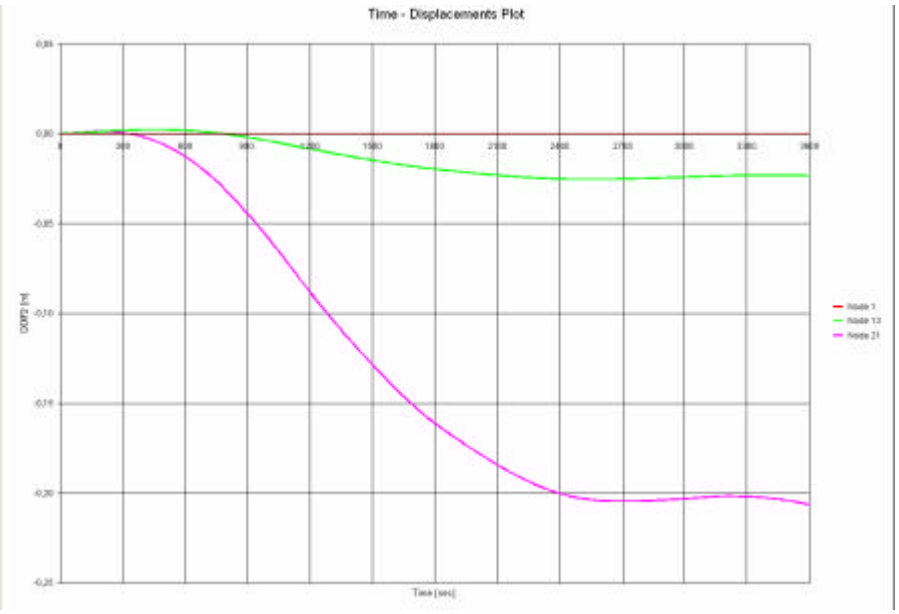


Fig.4-13 Gráfico del tiempo - desplazamiento vertical u para los nodos 1, 13 y 21

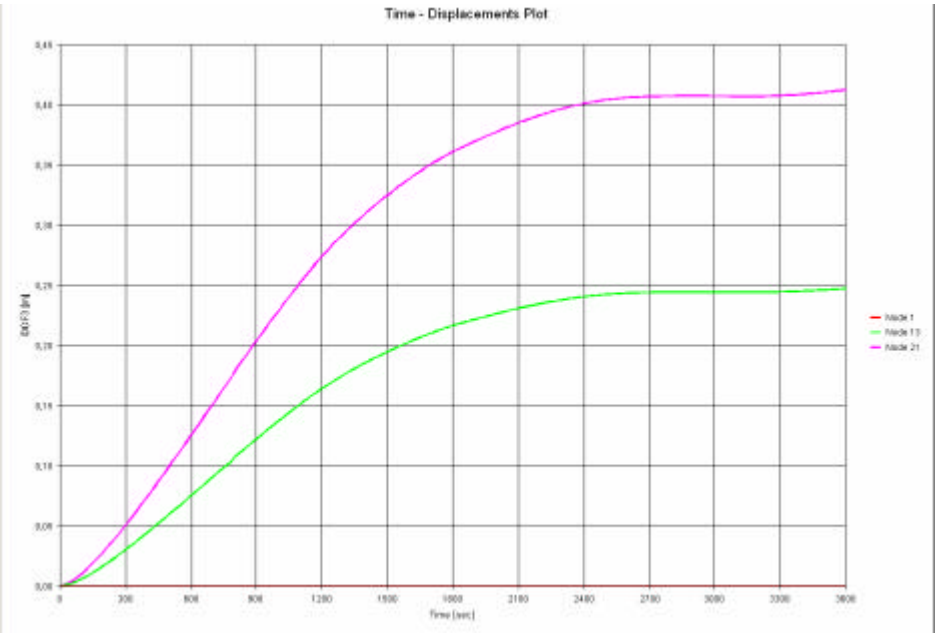


Fig.4-15 Gráfico del tiempo - giro acumulado j para los nodos 1, 13 y 21

	Node 1	C2	Node 13	C4	Node 21	C6
R1	5	0	5	0,00025	5	0,00042
…						
R228	3600	0	3600	0,24772	3600	0,41287

Se observa que un pilar HEB220 de altura 9.257m sometido a fuego ISO en una de sus caras sin ningún tipo de protección debe protegerse ya que la cabeza del pilar sufriría un desplazamiento horizontal de w = 1,89538 m.

Hay que tener en cuenta que dicho pilar está encajado en placas de hormigón y que dicho pilar se une a otro pilar a través de una viga metálica que soporta un altillo, éste consiste en una placa alveolar de hormigón de 200+50 (espesor placa 200mm + 50mm de recubrimiento de hormigón).

4.1.5 Análisis térmico de la viga armada que sustenta la placa alveolar 200+50

Viga armada que sustenta una placa alveolar de hormigón de 200mm de espesor con un recubrimiento de 50mm de hormigón.

Primero se hace un análisis térmico del caso más desfavorable, la viga sometida a fuego ISO sin la placa. Dicho análisis se realiza en 3600s.

Medidas viga armada:
Altura (h): 645mm.
Longitud del ala (b): 300mm.
Espesor del ala (t_f): 15mm.
Espesor del alma (t_w): 6mm.
Radio de soldadura (r): 4.2mm.

$$Radio de soldadura = 0.7 \cdot espesor del alma$$

Se realiza el gráfico de temperaturas entre 150 ºC y 850 ºC. Viga armada sometida en todo su contorno a fuego ISO durante 3600s.

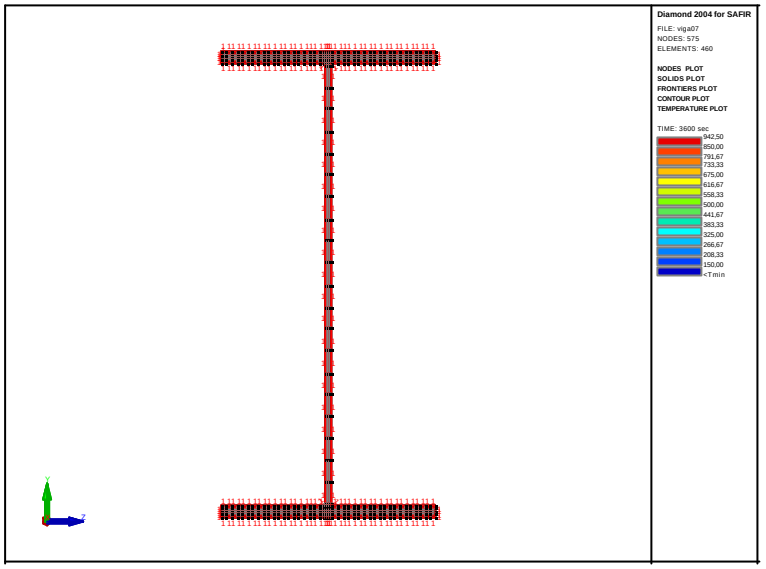


Fig.4-16 Gráfico de distribución de temperaturas de la viga armada sometida a fuego ISO en todo su contorno después de 3600s.

La temperatura alcanzada por la viga está entre 850 ºC y 942.50 ºC. Distribución de temperaturas en archivo viga07.tem

Esta viga soporta una placa alveolar de 200+50:
Espesor: 200mm.
Recubrimiento de hormigón: 50mm.
Longitud de la placa: 5.571m.

Por tanto se va a hacer un nuevo análisis térmico suponiendo una nueva condición de contorno. Fuego ISO en todo el contorno de la viga excepto en el trozo en que se apoya la placa alveolar en la viga.

En el caso de la viga armada + placa alveolar se ha considerado la zona de contacto entre viga y placa como una superficie adiabática formada por los elementos 218, 222, 226, 230, 234, 238, 242 y 246, que se encuentran en el lado derecho del alma de la viga. De esta manera se podrá observar si la placa alveolar influye en algo en la temperatura alcanzada por la viga, es decir, si dicha placa protege a la viga o no.

Gráfico de temperaturas entre 150 ºC y 850 ºC de la viga armada + placa alveolar.

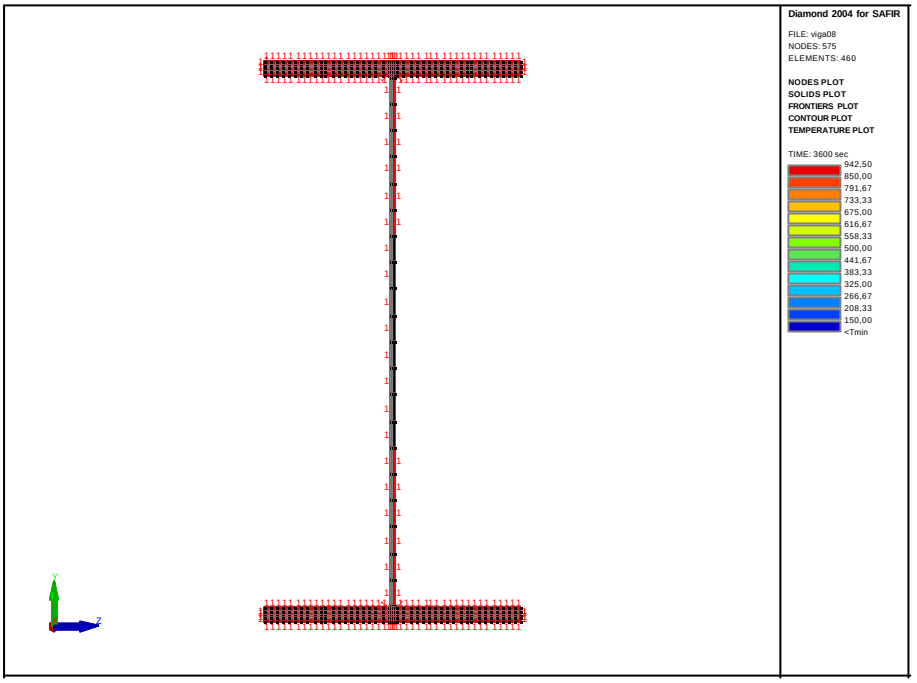


Fig.4-17 Gráfico de distribución de temperaturas de la viga armada +placa alveolar sometida a fuego ISO después de 3600s.

Según este resultado gráfico obtenido con el programa DIAMOND se observa que la placa alveolar 200+50 no protege la viga frente al fuego ISO y por tanto la temperatura máxima alcanzada sigue siendo entre 850 ºC y 942.50 ºC. Distribución de temperaturas en archivo viga08.tem.

4.1.6 Análisis de "sensibilidad de la malla"

Antes de continuar con el estudio y ver si los resultados obtenidos hasta ahora han sido correctos hay que ver si el mallado realizado es fiable. Para ello se realiza el análisis de "sensibilidad de la malla" para el caso del pilar HEB220 con caras interiores adiabáticas.

Se realiza un estudio del análisis térmico del pilar con diferentes mallados generados con el programa WIZARD:

- 584 elementos finitos.
- 1764 elementos finitos.
- 2764 elementos finitos.

Este análisis consiste en observar que para los diferentes mallados la temperatura alcanzada en los nodos de la cara del ala que está sometida a temperatura ambiente (20ºC) es aproximadamente la misma temperatura al cabo de 3600s, sometiendo una de las alas del pilar al fuego ISO.

Se ha comprobado anteriormente que el pilar+placas de hormigón encajadas se puede sustituir por el pilar HEB220 con caras interiores de alas y alma adiabáticas.

Las condiciones de contorno son las siguientes:
F20, temperatura ambiente de 20 ºC en el ala exterior a la nave TIPO
FISO, fuego ISO en el ala interior a la nave nido

Mediante el programa SAFIRWIZARD se genera el archivo.IN que se modifica según las condiciones de contorno de temperatura ambiente en el ala exterior del perfil HEB220 de la nave TIPO y fuego ISO en el ala que da al interior a la nave. Dicho archivo se introduce en el programa SAFIR2004 que realiza el análisis térmico del perfil, obteniéndose los archivos .OUT y .TEM. El archivo.OUT nos permite observar el resultado gráfico de la distribución de temperaturas en cada nodo en diferentes instantes de tiempo mediante el programa DIAMOND 2004.

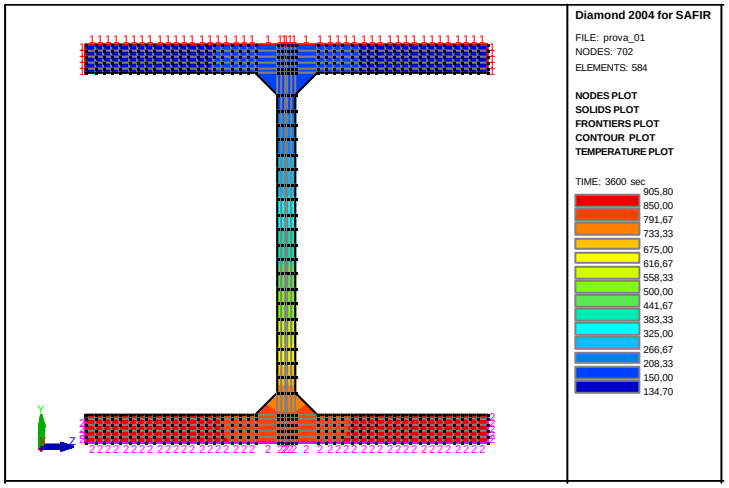


Fig.4-18 Gráfico de distribución de temperaturas entre 150 ºC y 850 ºC después de 3600s, mallado con 702 nodos y 584 elementos.

Temperatura máxima alcanzada de 905.80 ºC. Temperatura mínima alcanzada en el lado sometido a temperatura ambiente es de 134.70 ºC a 208.33 ºC.

A continuación se realiza el mismo estudio con otro tipo de mallado con 1764 elementos finitos y 1947 nodos después de 3600s. Gráfico de distribución de temperaturas entre 150 ºC y 850 ºC.

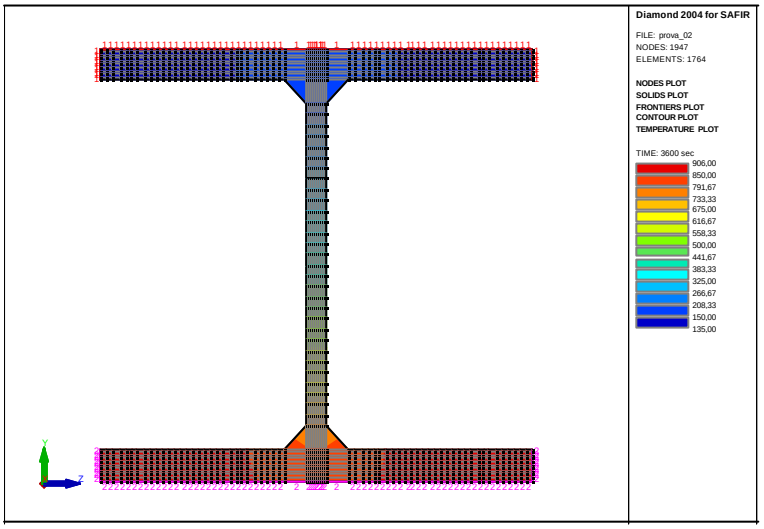


Fig.4-19 Gráfico de distribución de temperaturas entre 150 ºC y 850 ºC después de 3600s, mallado con 1764 elementos finitos y 1947 nodos.

En este caso de mallado la temperatura máxima alcanzada es de 906 ºC y la mínima entre 135 ºC y 208.33 ºC. Resultado muy similar al del mallado con 702 nodos y 584 elementos.

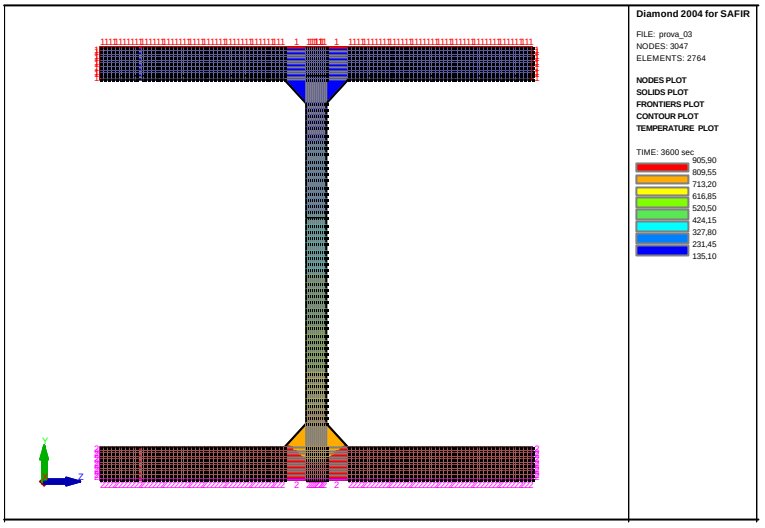


Fig.4-20 Gráfico de distribución de temperaturas entre 150 ºC y 850 ºC después de 3600s, mallado con 2764 elementos finitos y 3047 nodos.

Temperatura máxima alcanzada de 905.90 ºC. Temperatura mínima alcanzada en el lado sometido a temperatura ambiente es de 135.10 ºC a 231.345 ºC.

Se puede observar que las temperaturas máxima y mínima del perfil para los diferentes mallados es aproximadamente la misma, por tanto podemos asegurar que el mallado escogido en cada momento es correcto puesto que la temperatura alcanzada en el ala sometida a temperatura ambiente es similar para los diferentes mallados realizados, después de 3600s :

Elementos finitos	Nodos del mallado	Temperatura mínima	Temperatura máxima
584	702	134.70 ºC – 208.33 ºC	850 ºC-905.80 ºC
1764	1947	135 ºC – 208.33 ºC	850 ºC-906 ºC
2764	3047	135.10 ºC – 231.345 ºC	809.55 ºC-905.90 ºC

4.2 Protección para estructura metálica

A continuación se da la descripción técnica del producto que se utilizará para proteger los pilares y vigas. Es un mortero proyectado a base de lana de roca y cemento, generalmente de 30 mm de grosor. El programa SAFIR2004 nos permitirá saber si dicho espesor es efectivo para proteger el pilar durante 10800s. El material protector será:

MORTERO TECWOOL F. Protección contra el fuego y absorción acústica [8].

4.2.1 Descripción

• Se aplica por proyección mediante máquina neumática, directamente sobre el soporte a proteger.

• No es tóxico ni patógeno, biológicamente inerte, no contiene asbestos ni sílice cristalina en estado libre, por lo que no entraña riesgo para la salud.

• Su rapidez de aplicación, la gran facilidad de limpieza en zonas adyacentes al lugar y su ligereza, 250 kg/m³, hace que sea el producto más económico.

• Posee control de calidad en fabricación, que asegura la invariabilidad de sus características físico-químicas y por lo tanto sus propiedades de protección contra el fuego.

• Además de sus cualidades como protección contra el fuego, aporta una excelente absorción acústica, un poderoso aislamiento térmico y magníficas propiedades anticondensación.

4.2.2 Características

• Color blanco grisáceo.

• Densidad aplicada 250 kg/m³.

• Aspecto rugoso uniforme.

• Acabados: en bruto alisado con talocha o rodillo y rugoso decorativo.

• Excelente barrera térmica elástica sin uniones ni juntas.

• Posibilidad de aplicar pintura.

• Coeficiente de conductividad térmica 0,038 Kcal/m h° C.

$$0.038\frac{kcal}{mh^{o}C}\cdot\frac{1KJ}{0.24Kcal}\cdot\frac{10^{3}J}{1KJ}\cdot\frac{1h}{3600s}=0.044\frac{W}{mK}$$

dato que se introduce en el programa WIZARD para definir la conductividad térmica del mortero TECWOOL F [8] que protege al pilar HEB220.

• Protege contra la corrosión al acero.

• No contiene yeso, escayola, cal ni vermiculita.

• Imputrescible, inatacable por roedores y hongos.

• Resistencia a la compresión 18 kg/cm².

• Anticondensación, aunque no es capilar, retiene dos gramos de agua por dos gramos de producto.

• Absorbente acústico de gran eficacia.

• Proceso de fabricación controlado por laboratorio acreditado.

4.2.3 Ensayos

• Resistencia al fuego de estructuras metálicas según Normas UNE 23093, 23820 y 23806.

• Ensayo global de resistencia al fuego sobre elementos de hormigón según Normas UNE 13381-3:2001 y 13501-2:2000.

• Resistencia al fuego de forjados de hormigón con chapa metálica grecada colaborante según Normas UNE 23093 y 23802.

• Estabilidad al fuego de vigas de madera según Norma UNE 23093.

• Resistencia al fuego de forjados cerámicos según Normas UNE 23093 y 23802.

• Ensayos de adherencia y cohesión interna sobre todos los soportes existentes en construcción.

• Ensayos de no toxicidad según UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) fabricado con lana de roca exenta de todo riesgo para la salud, clasificado Xi:R:38 según directiva europea 67/548 CEE.

• Ensayos de aislamiento térmico y ensayos de absorción acústica.

Su amplia referencia de obras realizadas en toda Europa ponen de manifiesto que su profesionalidad le define como empresa líder.

Sistemas Ensayados en Laboratorio Oficial:

• Mortero ignífugo **TECWOOL** [8]. para protección de estructuras metálicas de hormigón y otros elementos de construcción.

• **Paneles** para compartimentaciones, protección de conductos de ventilación, cubiertas y falsos techos, etc.

• Sellados cortafuegos mediante **Sistema FLAMRO** de huecos atravesados por instalaciones, bandejas de cables, etc.

• Rejillas de ventilación intumescentes, sellados cortafuegos de tuberías combustibles y juntas de dilatación

4.2.4 Generación del mallado del conjunto pilar HEB220 + protección mortero Tecwool F de 30 mm de espesor

Se genera un nuevo mallado del conjunto pilar HEB220 + protección de mortero TECWOOL F, con espesor de 30mm hacia el exterior y de 14mm entre pilar y placas de hormigón:

Para generar los nodos se ha seguido el siguiente criterio:

Equidistancia entre nodos que pertenecen a la protección exterior:

- Según eje Y: 0.015 m, 0.008 m o 0.007 m según corresponda
- Según eje Z: 0.015 m o 0.0085 m según corresponda

Equidistancia entre nodos que pertenecen al material que está entre pilar y placas de hormigón:

- Según eje Y: 0.007 m
- Según eje Z: 0.015 m o 0.0085 m según corresponda

Protección exterior es de 30mm, protección interior entre pilar HEB220 y placas de hormigón es de 14mm.

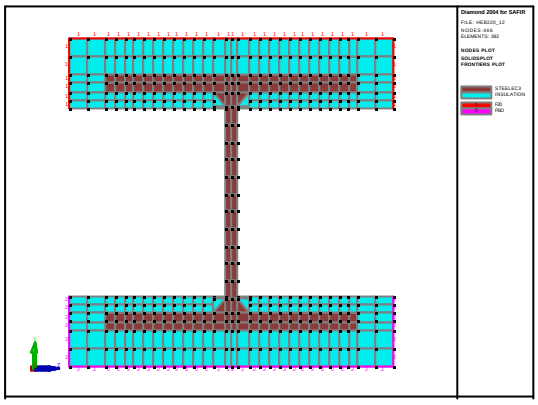


Fig.4-21 Discretización por elementos finitos del pilar HEB220 + protección de mortero TECWOOL F de 30mm de espesor, con 466 nodos y 382 elementos.

Se genera mallado con 466 nodos y 382 elementos. La protección de mortero TECWOOL F será de 30mm hacia el exterior mientras que entre pilar y placas de hormigón, es decir hacia el interior, será de 14mm de espesor.

A continuación se realiza el análisis térmico del conjunto pilar HEB220 + protección de mortero TECWOOL F durante 10800s de exposición a fuego ISO en una de las naves nido.

Una de las alas + protección está sometida a temperatura ambiente ya que se encuentra en nave nido en la que no hay incendio localizado, mientras que la otra ala + protección está sometida a fuego ISO ya que se encuentra en nave nido con incendio localizado.

Con el programa DIAMOND se obtiene el siguiente resultado gráfico, dentro del margen de temperaturas de 20ºC y 1200ºC:

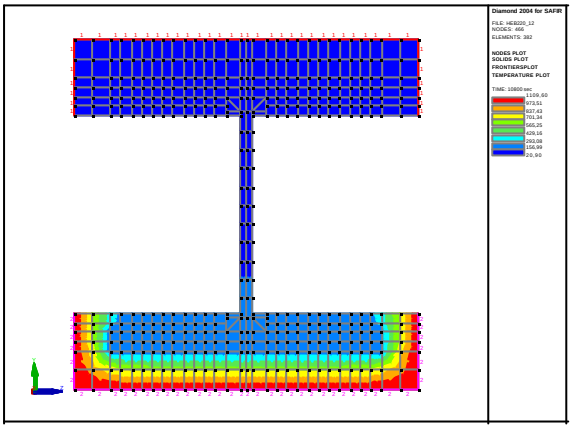


Fig.4-22 Distribución de temperaturas del pilar HEB220 + protección de mortero TECWOOL F de 30 mm. de espesor durante 180 min. de exposición a

Se observa que el pilar llega a una temperatura entre 156.99 ºC y 293.08 ºC, tampoco se supera los 400 ºC en que el acero sufriría deformación por superar el límite elástico. Por tanto dicha protección de espesor 30mm con mortero TECWOOL F es adecuada. El pilar aguanta la estructura de la nave nido durante 10800s (180 min).

4.2.5 Análisis del desplazamiento de la cabeza del pilar HEB220 + protección mortero Tecwool F de 30mm. de espesor.

Altura del pilar HEB220: 9.257 m.

Número de elementos del pilar HEB220_PROT: 10

Mediante el programa DIAMOND se puede observar que el nodo 21 que se encuentra en la cabeza del pilar protegido con mortero TECWOOL F, se desplaza 13.363 cm **Fig.4-23**, mientras que en el caso del pilar HEB220 sin proteger la cabeza del pilar tiene un desplazamiento de 189.538 cm **Fig.4-12**, de esta forma se observa que es necesario proteger el pilar para mejorar la estabilidad de la estructura de la nave.

	Node 18		C2	Node 19	C4	Node 20		C6	Node 21
	C8								
R1	5	0	5	-2e-005	5	0	5	-2e-005	
R2	10	0	10	-4e-005	10	0	10	-5e-005	
....									
R227	3584	0	3584	-0,10793	3584	0	3584	-0,13324	
R228	3600	0	3600	-0,10824	3600	0	3600	-0,13363	

Fig.4-23 Gráfico del tiempo-desplazamiento horizontal w de los nodos 21, 20,19,18 del pilar HEB220 protegido con mortero Tecwool F de 30 mm. de espesor.

Número de nodos del pilar HEB220_PROT: 21

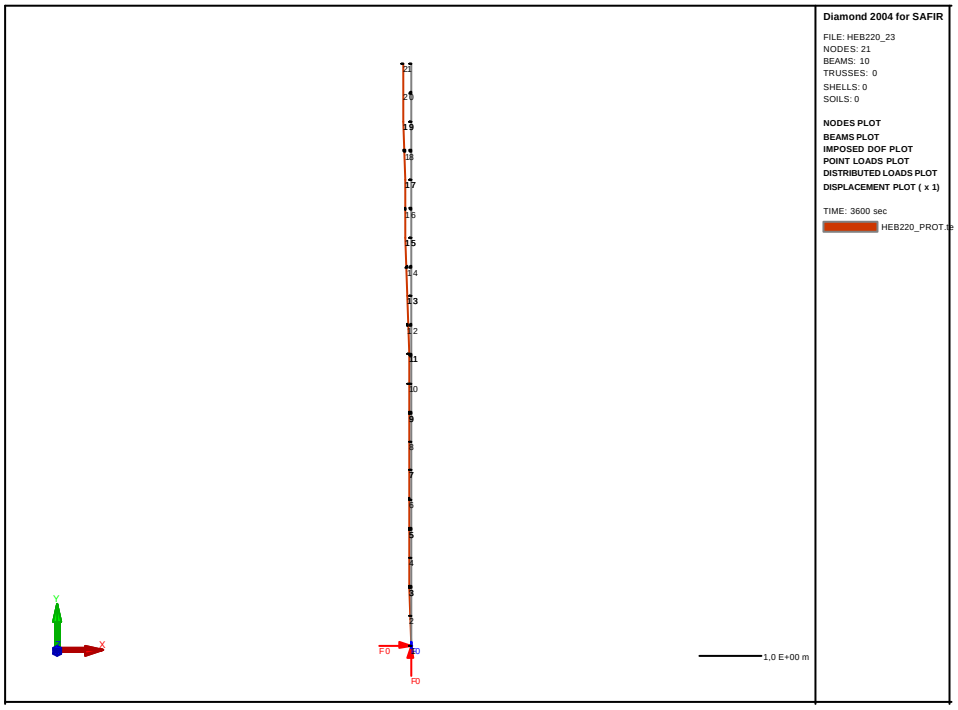


Fig.4-24 Desplazamiento de los 21 nodos del pilar HEB220+protección de mortero Tecwool F de 30mm de espesor.

4.2.6 Análisis térmico de la viga armada que sustenta la placa alveolar 200+50 + protección mortero Tecwool F de 30 mm.de espesor.

Se genera el mallado de la protección de mortero Tecwool F mediante el programa Excel. Se generan en total 444 nodos y 342 elementos del conjunto viga + protección. Con el programa DIAMOND se da el resultado gráfico del análisis térmico del conjunto viga + protección dentro de un margen de temperaturas entre 20ºC y 1200ºC.

Material viga armada: STEELC3 (Acero según Eurocódigo3)

Materia protección: INSULATION (Mortero Tecwool F con sus características)

Características del mortero:

Conductividad térmica: 0.044 W/mK

Calor específico: 0 J/KgK (suposición caso más desfavorable, ya que no se tienen datos).

Densidad: 250 Kg/m^3

Humedad: 0 Kg/m^3

Coeficiente de convección a temperatura caliente (aprox. 800 ºC): 25

Coeficiente de convección a temperatura fria (aprox. 20ºC): 9

Emisividad relativa: 0.5

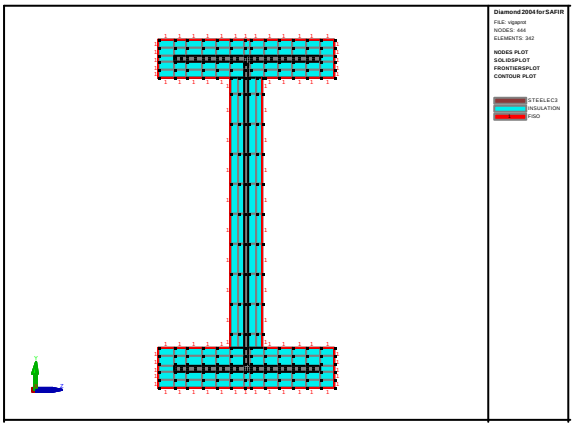


Fig.4-25 Discretización por elementos finitos del conjunto viga armada + protección de mortero Tecwool F de 30mm de espesor. 444 nodos y 342 elementos.

A continuación se realiza el análisis térmico de la viga armada protegida con mortero, sabiendo que dicho resultado gráfico se da entre 20ºC y 1200ºC, durante 10800s.

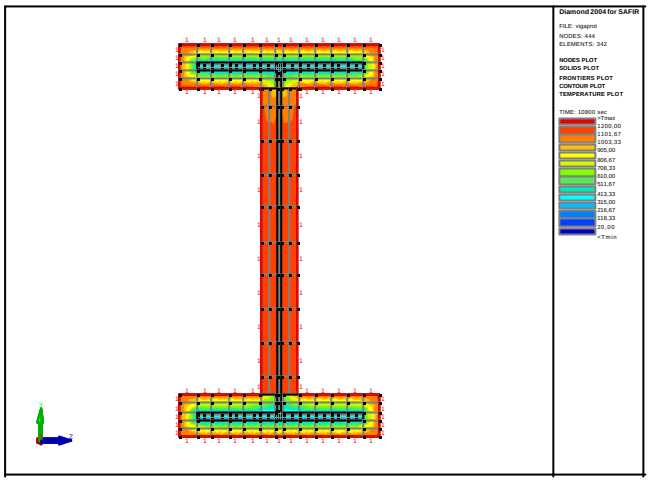


Fig.4-26 Distribución de temperaturas en cada nodo del cojunto viga armada + protección mortero Tecwool F 30mm de espesor durante 10800s.

4.3 Caracterización de los establecimientos industriales en relación con la seguridad contra incendios

4.3.1 Establecimiento

Se entiende por establecimiento el conjunto de edificios, edificio, zona de éste, instalación o espacio abierto de uso industrial o almacén, destinado a ser utilizado bajo una titularidad diferenciada y cuyo proyecto de construcción o reforma, así como el inicio de la actividad prevista, sea objeto de control administrativo.

Los establecimientos industriales se caracterizarán por:

a. Su configuración y ubicación con relación a su entorno.

b. Su nivel de riesgo intrínseco.

4.3.2 Características de los establecimientos industriales por su configuración y ubicación con relación a su entorno

Las muy diversas configuraciones y ubicaciones que pueden tener los establecimientos industriales se consideran reducidas a:

Establecimientos industriales ubicados en un edificio:

• **Tipo A:** el establecimiento industrial ocupa parcialmente un edificio que tiene, además, otros establecimientos, ya sean estos de uso industrial ya de otros usos.

• **Tipo B**: el establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio que está adosado a otro u otros edificios, o a una distancia igual o inferior a tres metros de otro u otros edificios, de otro establecimiento, ya sean estos de uso industrial o bien de otros usos.

Para establecimientos industriales que ocupen una nave adosada con estructura compartida con las contiguas, que en todo caso deberán tener cubierta independiente, se admitirá el cumplimiento de las exigencias correspondientes al tipo B, siempre que se justifique técnicamente que el posible colapso de la estructura no afecte a las naves colindantes.

• **Tipo C:** el establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio, o varios, en su caso, que está a una distancia mayor de tres metros del edificio más próximo de otros establecimientos. Dicha distancia deberá estar libre de mercancías combustibles o elementos intermedios susceptibles de propagar el incendio.

Establecimientos industriales que desarrollan su actividad en espacios abiertos que no constituyen un edificio:

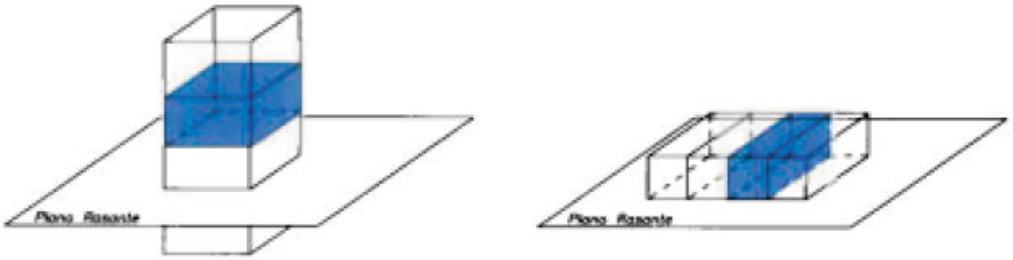
• **Tipo D:** el establecimiento industrial ocupa un espacio abierto, que puede estar totalmente cubierto, alguna de cuyas fachadas carece totalmente de cerramiento lateral.

• **Tipo E:** el establecimiento industrial ocupa un espacio abierto que puede estar parcialmente cubierto (hasta un 50 % de su superficie), alguna de cuyas fachadas en la parte cubierta carece totalmente de cerramiento lateral.

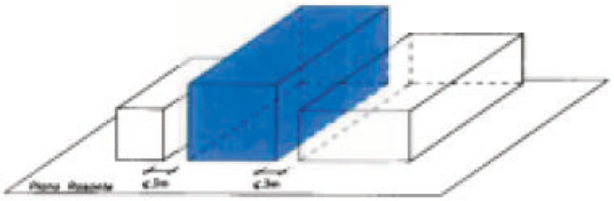
En este proyecto se analiza el caso de la nave industrial nido considerada como establecimiento industrial ubicado en un edificio Tipo A en horizontal, ya que la nave nido está adosada a varias naves nido, compartiendo pilares. Se trata de conseguir que la nave sea un edificio industrial tipo B al conseguir que un incendio localizado en una de las naves nido no se propague a las naves adyacentes, y que el colapso ni el derrumbe de la nave nido no afecte a las naves adyacentes.

• **Tipo A:** estructura portante común con otros establecimientos

En vertical. En horizontal.



• **Tipo B**



4.3.3 Caracterización de los establecimientos industriales por su nivel de riesgo intrínseco

El nivel de riesgo intrínseco de cada sector o área de incendio de la nave nido se evaluará: Calculando la siguiente expresión, que determina la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, de dicho sector o área de incendio, donde:

$$Q_S = \frac{\sum G_i \cdot q_i \cdot C_i}{A} \cdot R_a \quad (\text{MJ/m}^2) \text{ o } (\text{Mcal/m}^2)$$

• Q_S = densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del sector o área de incendio, en MJ/m2 o Mcal/m2.

• Gi = masa, en kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector o área de incendio (incluidos los materiales constructivos combustibles).

• qi = poder calorífico, en MJ/kg o Mcal/kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

• Ci = coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

• Ra = coeficiente adimensional que corrige el grado de peligrosidad (por la activación) inherente a la actividad industrial que se desarrolla en el sector de incendio, producción, montaje, transformación, reparación, almacenamiento, etc.

Cuando existen varias actividades en el mismo sector, se tomará como factor de riesgo de activación el inherente a la actividad de mayor riesgo de activación, siempre que dicha actividad ocupe al menos el 10 % de la superficie del sector o área de incendio.

• A = superficie construida del sector de incendio o superficie ocupada del área de incendio, en m2. Los valores del coeficiente de peligrosidad por combustibilidad, Ci, de cada combustible pueden deducirse de la **Tabla.4-1**, del Catálogo CEA de productos y mercancías, o de tablas similares de reconocido prestigio cuyo uso debe justificarse.

Valores del coeficiente de peligrosidad por combustibilidad, C_i		
Alta	**Media**	**Baja**
• Líquidos clasificados como clase A en la ITC MIE-APQ1 • Líquidos clasificados como subclase B1, en la ITC MIE-APQ1. • Sólidos capaces de iniciar su combustión a una temperatura inferior a 100 °C. • Productos que pueden formar mezclas explosivas con el aire a temperatura ambiente. • Productos que pueden iniciar combustión espontánea en el aire a temperatura ambiente.	• Líquidos clasificados como subclase B2 en la ITC MIE-APQ1. • Líquidos clasificados como clase C en la ITC MIE-APQ1. • Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura comprendida entre 100 °C y 200 °C. • Sólidos que emiten gases inflamables.	• Líquidos clasificados como clase D en la ITC MIE-APQ1. • Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura superior a 200 °C.
C_i = 1,60	C_i = 1,30	C_i = 1,00

NOTA: ITC MIE-APQ1 del Reglamento de almacenamiento de productos químicos, aprobado por el Real Decreto 379/2001, de 6 de abril.

Tabla.4-1 Grado de peligrosidad de los combustibles

Q_S = densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del sector o área de incendio, en MJ/m2 o Mcal/m2.

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m²	MJ/m²
BAJO	1	$Q_S \leq 100$	$Q_S \leq 425$
	2	$100 < QS \leq 200$	$425 < Q_S \leq 850$
MEDIO	3	$200 < Q_S \leq 300$	$850 < Q_S \leq 1275$
	4	$300 < Q_S \leq 400$	$1275 < Q_S \leq 1700$
	5	$400 < Q_S \leq 800$	$1700 < Q_S \leq 3400$
ALTO	6	$8005 < Q_S \leq 1600$	$3400 < Q_S \leq 6800$
	7	$1600 < Q_S \leq 3200$	$6800 < Q_S \leq 13600$
	8	$3200 < Q_S$	$13600 < Q_S$

Tabla.4-2 Nivel de riesgo intrínseco en función de la densidad de carga de fuego ponderada y corregida.

Dependiendo del valor obtenido en Q_S un establecimiento industrial puede definirse con un nivel de riesgo intrínseco de incendio bajo, medio o alto.

4.4 Estabilidad al fuego de los elementos constructivos portantes

Las exigencias de comportamiento ante el fuego de un elemento constructivo portante se definen por el tiempo en minutos, durante el que dicho elemento debe mantener la estabilidad mecánica (o capacidad portante) en el ensayo normalizado conforme a la norma correspondiente de las incluidas en la Decisión 2000/367/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000, modificada por la Decisión 2003/629/CE de la Comisión.

La estabilidad ante al fuego, exigible a los elementos constructivos portantes en los sectores de incendio de un establecimiento industrial, se determina en este proyecto por análisis termo-mecáncio con SAFIR2004.

Para el caso del análisis del pilar HEB220 + protección de mortero Tecwool F con 30mm de espesor **Fig.4-22** realizado mediante el programa SAFIR2004 se ha observado

anteriormente que dicho pilar es capaz de mantener la estabilidad de estructura de la nave nido durante 180min., cumpliéndose así una R-180. El RSIEI [2] dice:

Nivel de riesgo intrínseco	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante
BAJO	R 120 *(EF – 120)*	R 90 *(EF – 90)*	R 90 *(EF – 90)*	R 60 *(EF – 60)*	R 60 *(EF – 60)*	R 30 *(EF – 30)*
MEDIO	NO ADMITIDO	R 120 *(EF – 120)*	R 120 *(EF – 120)*	R 90 *(EF – 90)*	R 90 *(EF – 90)*	R 60 *(EF – 60)*
ALTO	NO ADMITIDO	NO ADMITIDO	R 180 *(EF -180)*	R 120 *(EF -120)*	R 120 *(EF -120)*	R 90 *(EF – 90)*

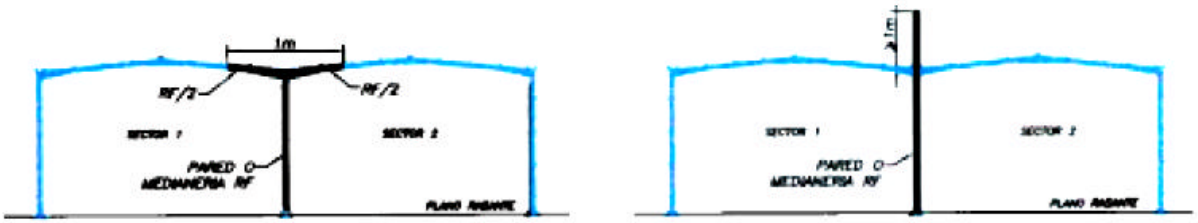
Tabla.4-3 Estabilidad al fuego de elementos estructurales portantes

Por tanto para el análisis de la protección (mortero TECWOOL F) [8] de los pilares HEB220 realizado mediante el programa SAFIR2004 se ha considerado:

- un nivel de riesgo intrínseco alto, caso de incendio más desfavorable.
- un establecimiento industrial considerado tipo B, en planta sobre rasante.
- un tiempo de 180 min. que aguantan los pilares HEB220 + protección sometidos a fuego ISO (R-180).

4.4.1 Para cubiertas ligeras de los edificios industriales de tipo A con medianerías

Naves industriales de tipo A con medianerías (edificación en planta baja).



Para la estructura principal de cubiertas ligeras y sus soportes en plantas sobre rasante, no previstas para ser utilizadas en la evacuación de los ocupantes, siempre que se justifique que su fallo no pueda ocasionar daños graves a los edificios o establecimientos próximos, ni comprometan la estabilidad de otras plantas inferiores o la sectorización de incendios implantada y, si su riesgo intrínseco es medio o alto, disponga de un sistema de extracción de humos, se podrán adoptar los valores siguientes:

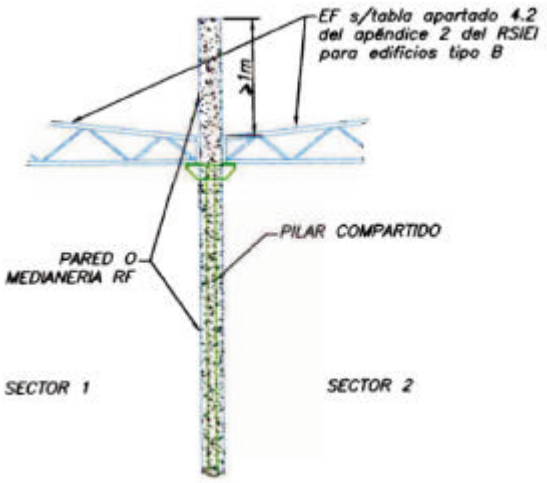
Estabilidad al fuego según la siguiente **Tabla.4-4**, para edificios tipo B. La viga de cubierta debe cumplir la siguiente tabla por tratarse la nave nido de un edificio tipo B.

Nivel de riesgo intrínseco	TIPO B	TIPO C
	Sobre rasante	Sobre rasante
Riesgo bajo	R 15 *(EF-15)*	No se exige
Riesgo medio	R 30 *(EF-30)*	R 15 *(EF-15)*
Riesgo alto	R 60 *(EF-60)*	R 30 *(EF-30)*

Tabla.4-4 Estabilidad al fuego de estructura principal de cubierta

La estructura principal de la cubierta puede adoptar los valores de estabilidad ante el fuego de la **Tabla.4-4** correspondientes a los valores de establecimiento de tipo B.

Esta condición no será aplicable cuando la cubierta sea compartida por dos o más establecimientos industriales distintos. En el caso particular de este proyecto cada nave TIPO tiene su correspondiente cubierta de esta forma se puede utilizar la **Tabla.4-4** para encontrar la R de los perfiles en Z que se encuentran en la cubierta del pórtico de la nave.



4.5 Análisis de la respuesta mecánica de la nave TIPO frente un incendio

4.5.1 Distribución de cargas en pórtico

Dicho pórtico está formado por: dos pilares HEB220 + viga armada que sustenta la placa alveolar 200+50 + viga de cubierta perfil Z.

Para realizar el análisis mecánico de los tres pórticos mediante el programa SAFIR2004 se considera que la viga armada y el perfil Z de cubierta se encuentran articulados a los pilares HEB220. Características de la viga armada: h=645mm, b=300mm, t_f=15mm, t_w=6mm, r=4.2mm.

La placa alveolar 200+50 que se apoya en la viga armada tiene una sobrecarga de uso que dependerá del tipo de actividad que se realice en el altillo de la nave.

En caso de situación de fuego accidental se tiene que:

$q_{d,fi} = g_{G,fi} \cdot G + g_{Q,fi} \cdot Q = 1.0 \cdot G + 0.9 \cdot Q$ (caso más desfavorable en situación de incendio en almacén del altillo)

Para el caso de la placa alveolar (altillo) de la nave nido se tienen las siguientes cargas:

G = Peso propio de forjados = 6.10 KN/m^2

Q = Sobrecarga de uso de forjados = 10 KN/m^2

Se considera S a la distancia que existe entre las dos vigas armadas que sustentan la placa alveolar:

S = 5.478 m

Para poder introducir en SAFIR2004 estos datos de carga que actúan sobre la viga se tienen que pasar a N/m. Por tanto se tiene que:

$$G = 6.10 \cdot \frac{S}{2} = 6.10 \cdot \frac{5.478}{2} = 16.71 \frac{KN}{m}$$

$$Q = 10 \cdot \frac{S}{2} = 10 \cdot \frac{5.478}{2} = 27.39 \frac{KN}{m}$$

Por tanto la carga uniformemente repartida en el altillo (placa alveolar 200+50 + viga armada) en caso de incendio accidental es de:

$$q_{d,fi} = g_{G,fi} \cdot G + g_{Q,fi} \cdot Q = 1.0 \cdot G + 0.9 \cdot Q = 1.0 \cdot 16.71 + 0.9 \cdot 27.39 = 41.361 \frac{KN}{m}$$

En la representación de los tres pórticos de la nave mediante el programa SAFIR2004 se ha considerado que:

La viga armada de la nave TIPO tiene una longitud de:

L=9.805m

por tanto el perfil Z tendrá también tendrá esa misma longitud:

L=9.805m

La altura a la que se encuentra la viga armada respecto del suelo es:

H'=4.987m

La altura de los dos pilares HEB220 es:

H=9.257m

Se considera que dicho pórtico de la nave TIPO está formado por:

- 2 pilares HEB220 (sección de clase 1)
- 1 viga armada (sección de clase 3) que soporta el altillo (placa alveolar 200+50)
- 1 viga de cubierta que se trata de un perfil Z (sección de clase 4)

Al tener los archivos.TEM de los pilares HEB220, de la viga armada y del perfil Z sometidos a fuego ISO se puede observar cual será la respuesta mecánica de los tres pórticos de la nave.

Según cálculos realizados en el apartado de modelos de cálculo simplificados en la cabeza del pilar se tiene el esfuerzo axil:

Para pilar del extremo: $N_{sd} = N - q \cdot \frac{L}{2} = 28.665 - 0.6162 \cdot \frac{10}{2} = 25.584 KN$

Para pilar compartido por naves: 2 $N_{sd} = 51.168 KN$

Carga que soporta el perfil Z de cubierta según el apartado de modelos de cálculo simplificado:

$$q = (1 \cdot 0.23 + 0.2 \cdot 0.80) \cdot d = 0.39 \cdot 1.58 = 0.6162 \frac{KN}{m}$$

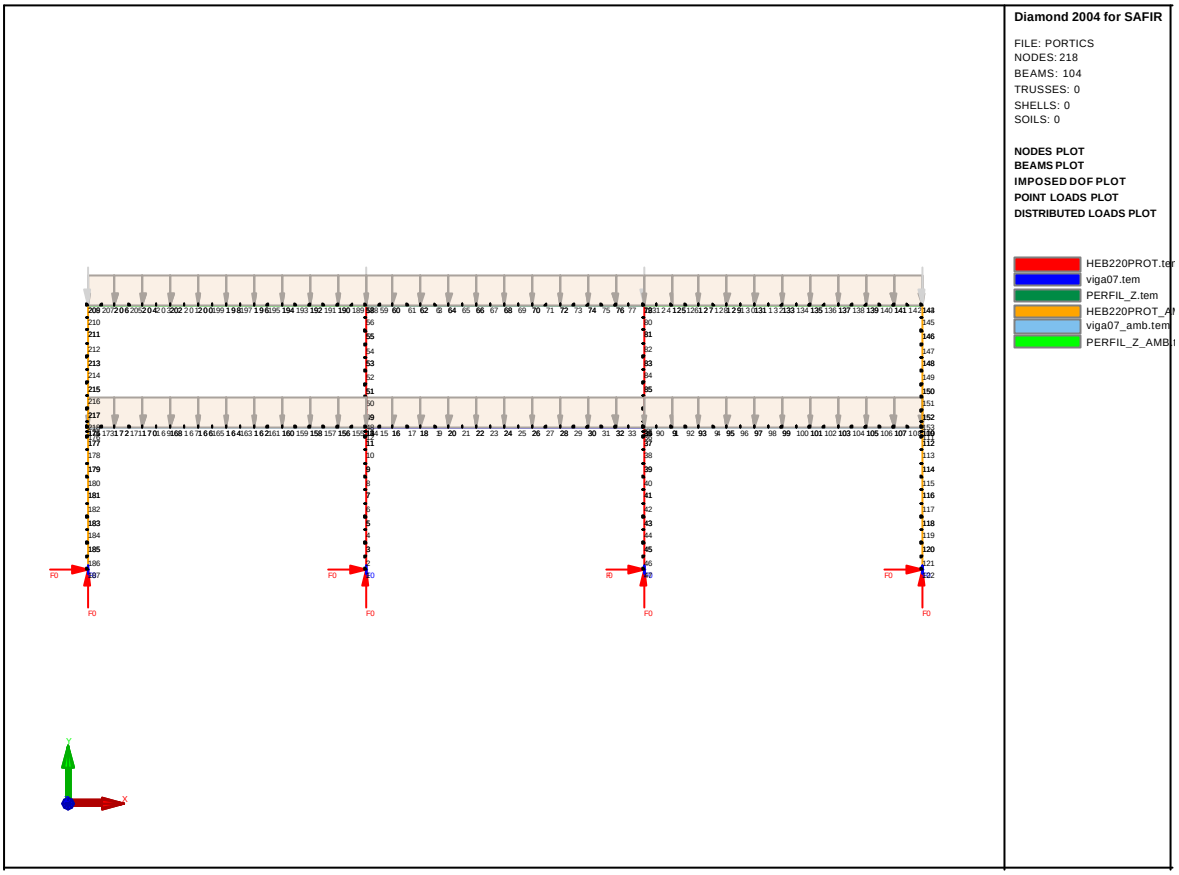


Fig.4-27 Generación de los tres pórticos de tres naves TIPO con 218 nodos y 104 elementos, sometido a fuego ISO el pórtico intermedio.

Una vez introducido el archivo.IN en el programa SAFIR2004 se obtiene el archivo PORTIC.OUT que nos permite observar el resultado gráfico de los tres pórticos mediante el programa DIAMOND dando la respuesta mecánica de los tres pórticos para saber el tiempo de colapso de la nave TIPO. Se realizan dos tipos de análisis el estático y el dinámico.

El análisis dinámico nos permite introducir la inercia de cada uno de los elementos constructivos de la nave, lo que permite aumentar el tiempo de estabilidad al fuego ISO de los pórticos de la nave TIPO. Se considera:

HEB220: 71.50Kg/m

Viga armada: 71.50Kg/m

Perfil Z: 6Kg/m

4.6 Análisis de tres pórticos sometidos a fuego ISO

4.6.1 Análisis estático de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico intermedio, pilares y vigas protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

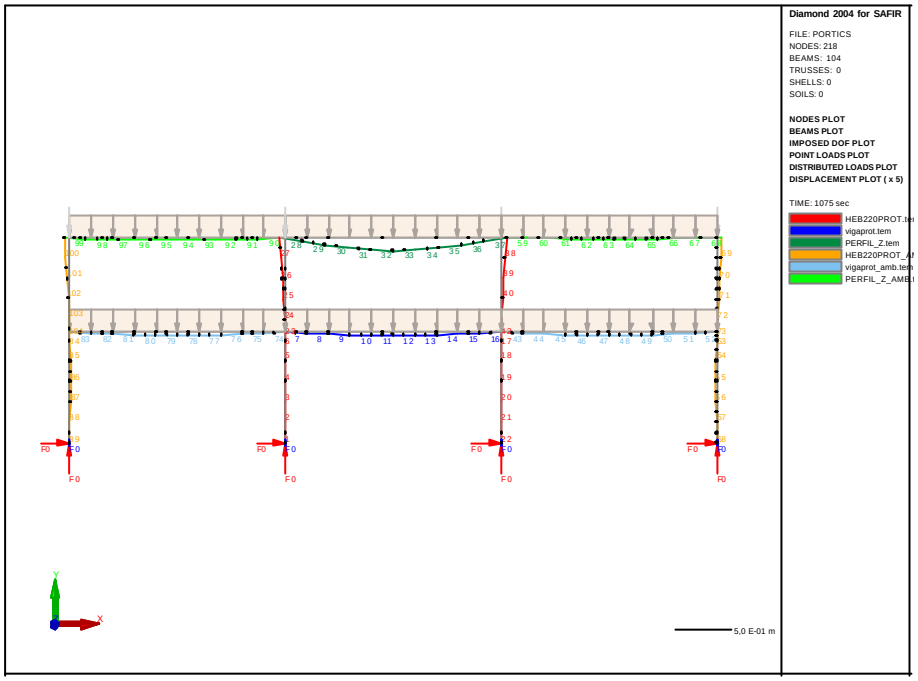


Fig.4-28 Gráfico con factor de escala: 5. Colapso al cabo de 1075s (17.92min)

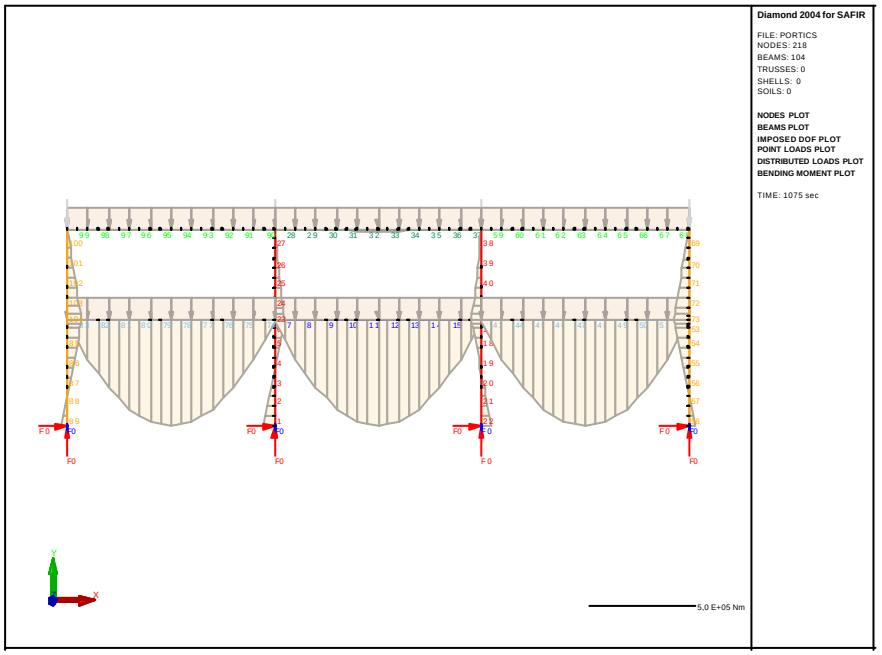


Fig.4-29 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.6.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico intermedio, pilares y viga armada protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

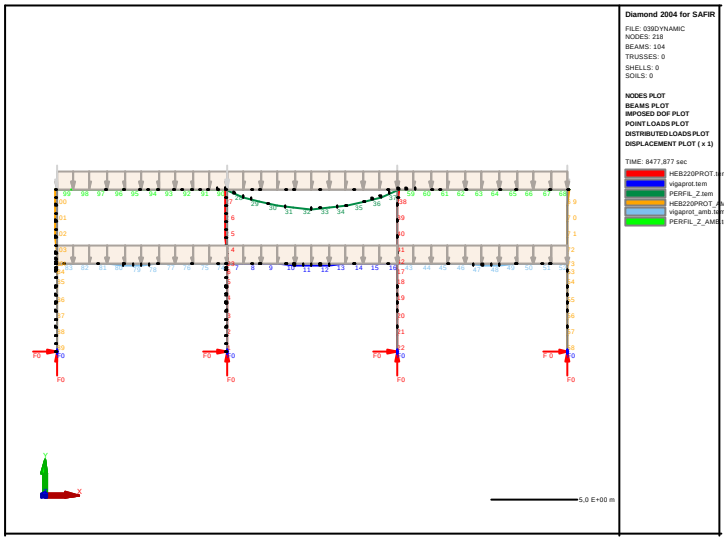


Fig.4-30 Gráfico con factor de escala: 1. Colapso al cabo de 8477.877s (141.30min=2.35h)

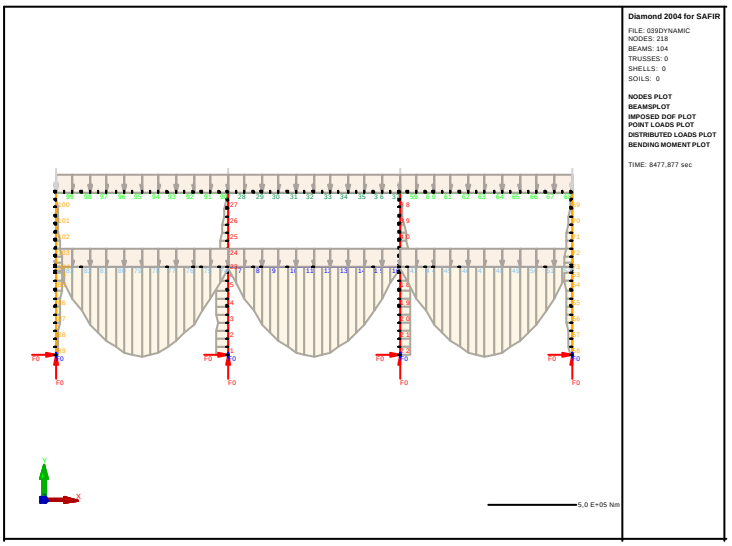


Fig.4-31 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.6.3 Análisis estático de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico de esquina, pilares y viga armada protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

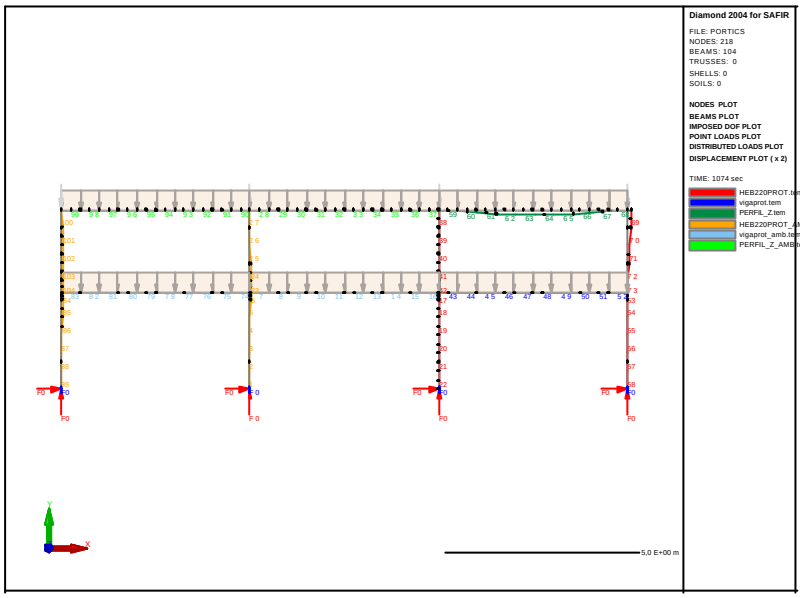


Fig.4-32 Gráfico con factor de escala: 2. Colapso al cabo de 1074s (17.9min)

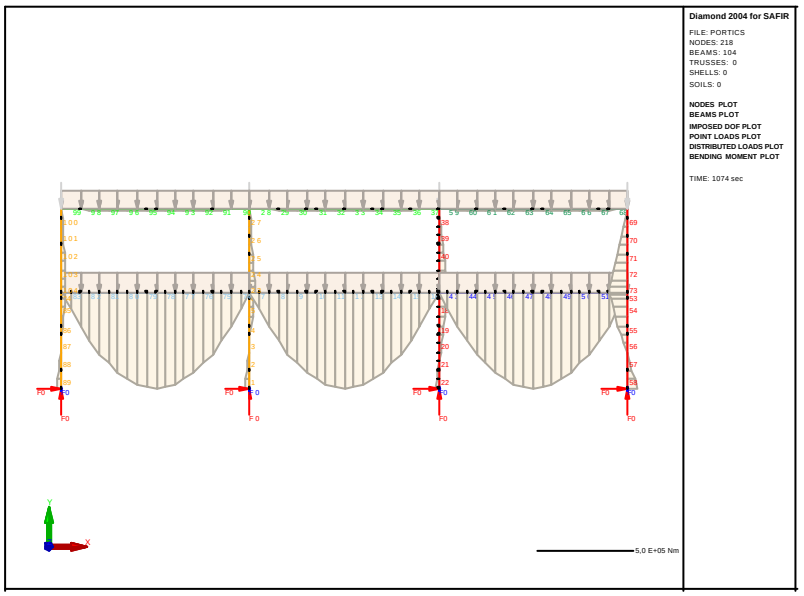


Fig.4-33 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.6.4 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego ISO en el pórtico de esquina, pilares y viga armada protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

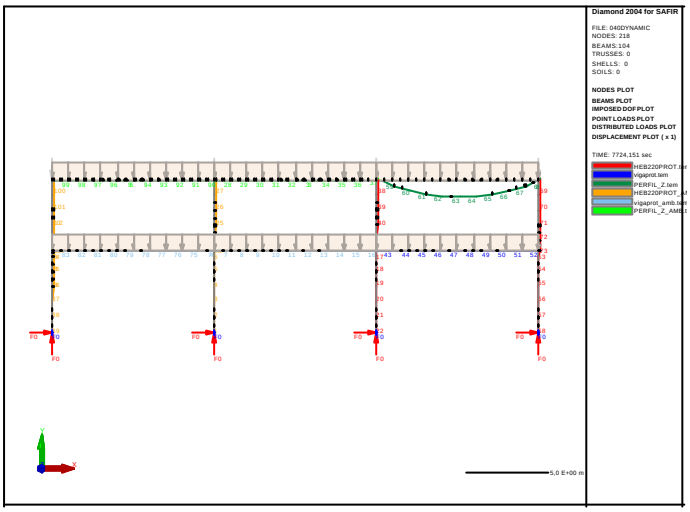


Fig.4-34 Gráfico con factor de escala: 1. Colapso al cabo de 7724.151s (128.73min=2.14h)

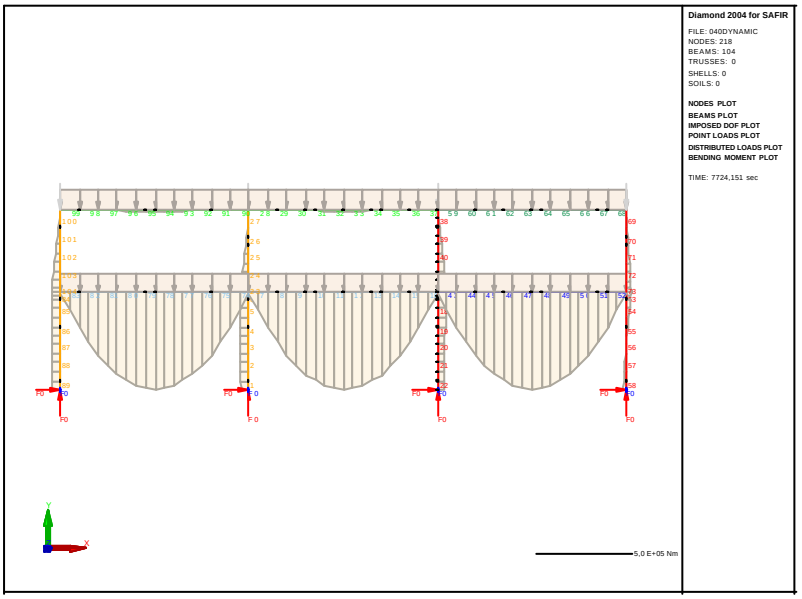


Fig.4-35 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.7 Análisis de tres pórticos sometidos a fuego NATURAL

Para poder ejecutar el programa SAFIR 2004 y realizar el análisis de tres pórticos de la nave sometidos a fuego real, es decir fuego NATURAL, se consideran dos casos concretos:

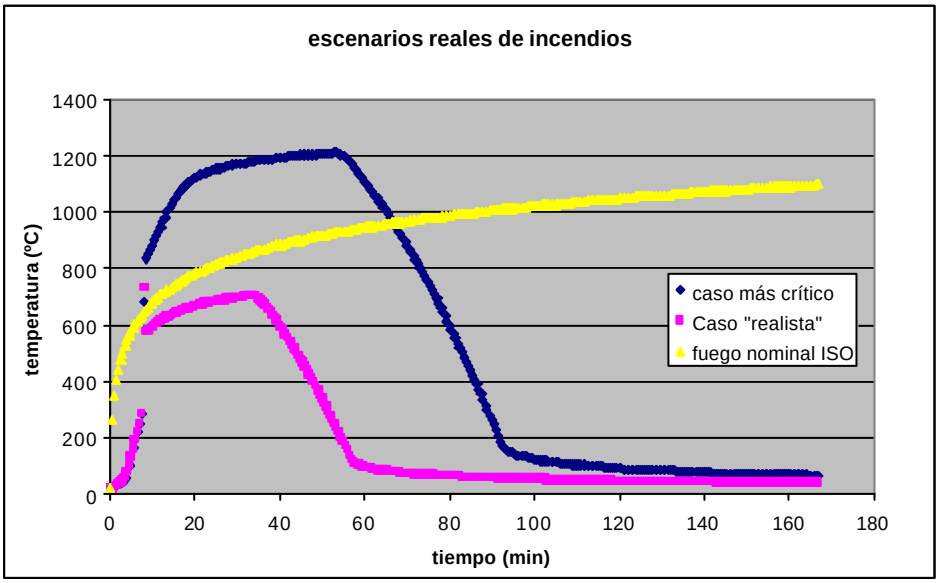
- Caso más crítico:

Superficie de la zona de fuego	70 m^2
Velocidad de liberación de calor	1900Kw/m^2
Densidad de carga de fuego	3400MJ/m^2
Nivel de riesgo intrínseco	nivel 5

- Caso "realista":

Superficie de la zona de fuego	70 m^2
Velocidad de liberación de calor	1000Kw/m^2
Densidad de carga de fuego	990MJ/m^2
Nivel de riesgo intrínseco	nivel 3

Entendiendo por nivel de riesgo intrínseco el que corresponde al RSIEI, tanto el nivel 3 como el nivel 5 implican un nivel de riesgo intrínseco medio del sector de incendio. Estas curvas de fuego real, la del caso más crítico, la del caso "realista" y la de fuego nominal ISO han sido generadas con en el programa OZONE. Los puntos de estas curvas nos van a premitir generar el archivo nfire.fct para nivel 5 y otro para nivel 3.



t (s)	nivel 5 T (ºC)	nivel 3 T (ºC)
0	20	20
1200	1120,23	666,349
2400	1193,39	601,381
3000	1207,71	339,456
3600	1112,52	96,95
4200	883,738	73,706
4800	600,743	63,517
5400	262,56	57,143
6000	124,205	52,59
7200	91,822	46,358
8400	77,087	42,221
9600	67,921	39,25
10020	65,448	38,396

Estos archivos nos van a permitir modificar las condiciones de contorno de fuego ISO de cada uno de los elementos constructivos de la nave, el perfil HEB220, la viga armada y el perfil Z para poder realizar el análisis de los pórticos sometidos a fuego NATURAL.

4.7.1 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico intermedio, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor

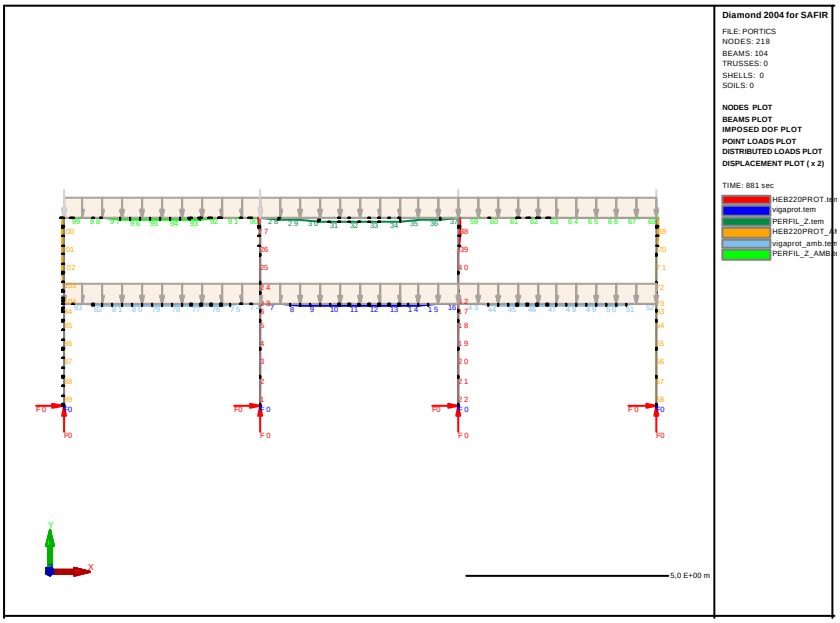


Fig.4-36 Gráfico con factor de escala: 2. Colapso al cabo de 881s (14.68 min)

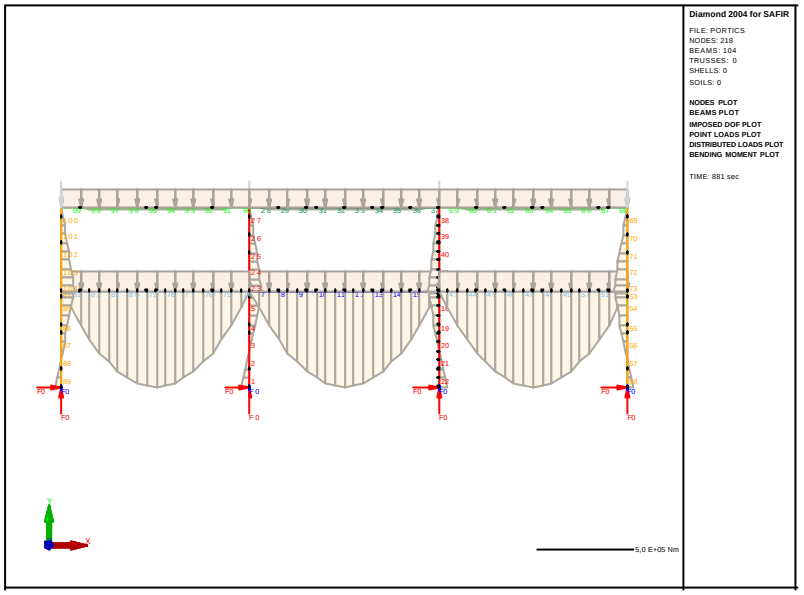


Fig.4-37 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.7.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico intermedio, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor

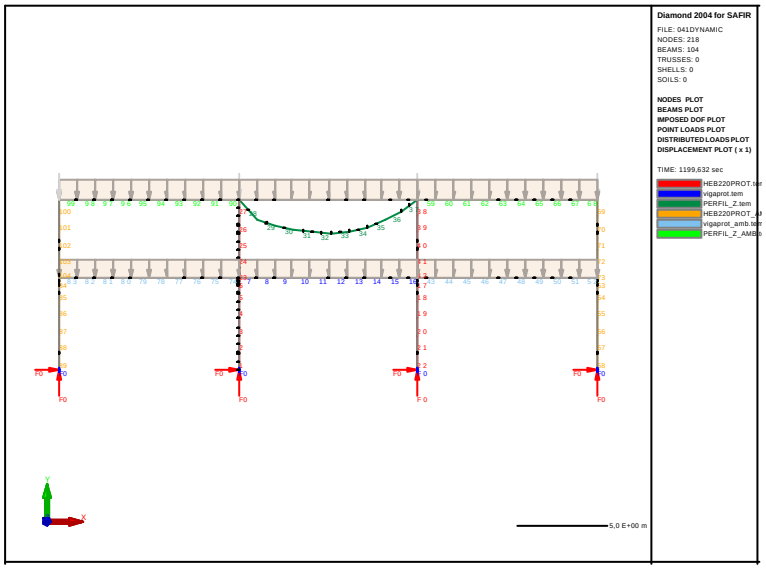


Fig.4-38 Gráfico con factor de escala: 1. Colapso al cabo de 1199.632s (19.99 min)

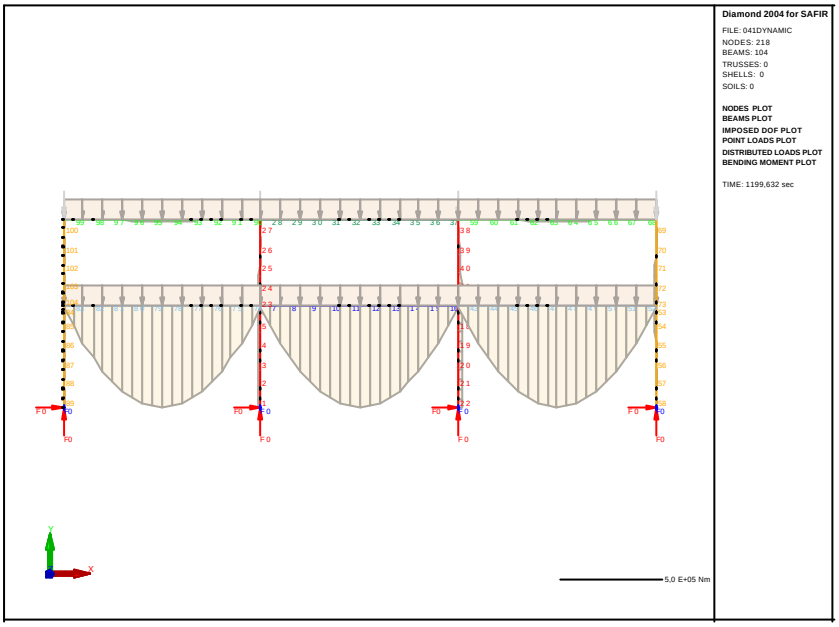


Fig.4-39 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.7.3 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso "realista" en el pórtico de esquina, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor

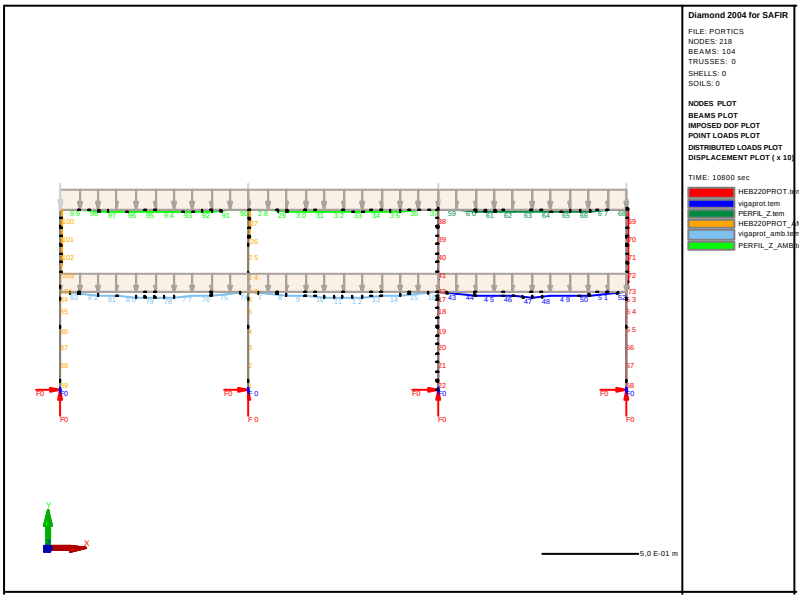


Fig.4-40 Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s.

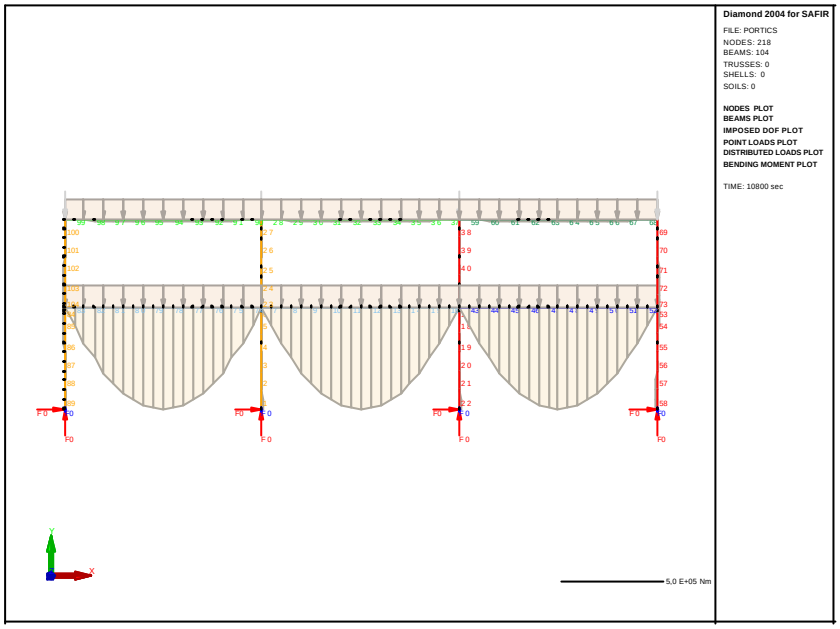


Fig.4-41 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.7.4 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso "realista" en el pórtico de esquina, pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor

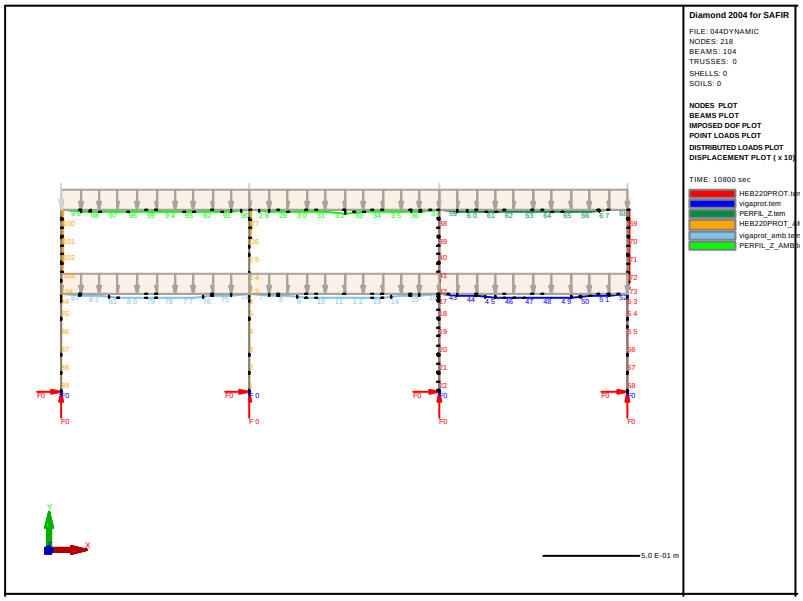


Fig.4-42 Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s. (3h)

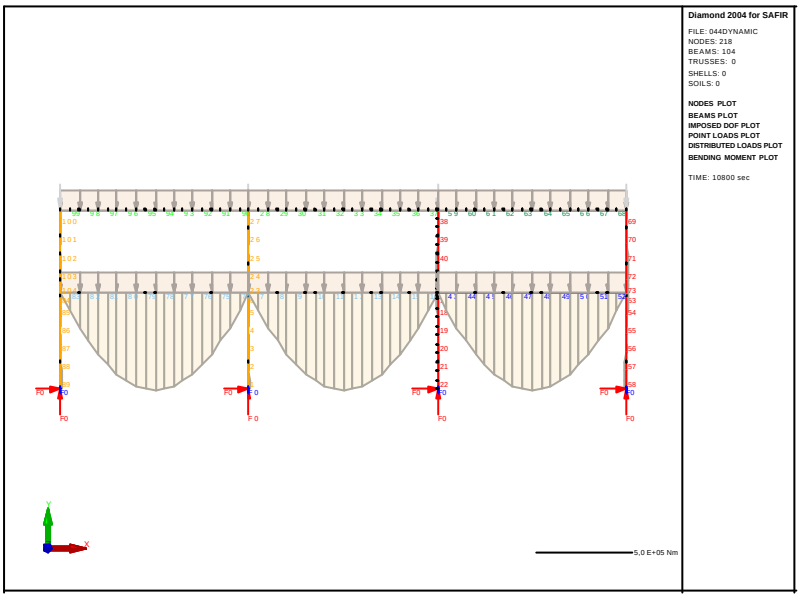


Fig.4-43 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.8 Análisis de los tres pórticos según perfil Z de cubierta

4.8.1 Perfil Z de cubierta deslizante

A continuación se realiza el análisis dinámico para el caso “realista” con fuego NATURAL, con perfil Z de cubierta deslizante y con incendio localizado en pórtico intermedio y de esquina.

Se modifica el archivo.IN para indicar que el perfil Z es deslizante al añadir los siguientes comandos de SAFIR2004:

```
SAME NODE1 NODE2  DISPL. X  DISPL.Y  ROTATE.Z
SAME  57  58    NO   YES   NO
SAME  79  123   NO   YES   NO
SAME  208  209    NO   YES   NO
```

4.8.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL en el pórtico intermedio con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor y con perfil Z deslizante.

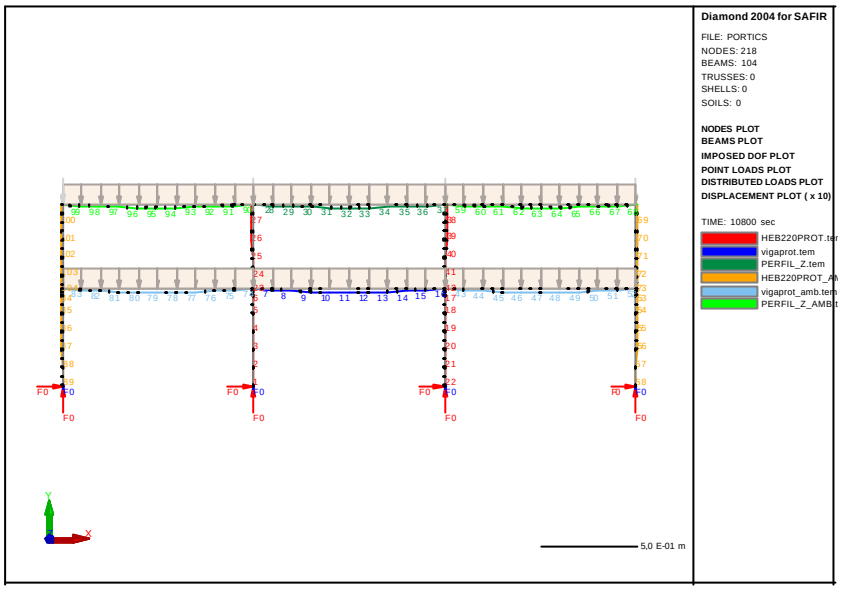


Fig.4-44 Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s. (3h)

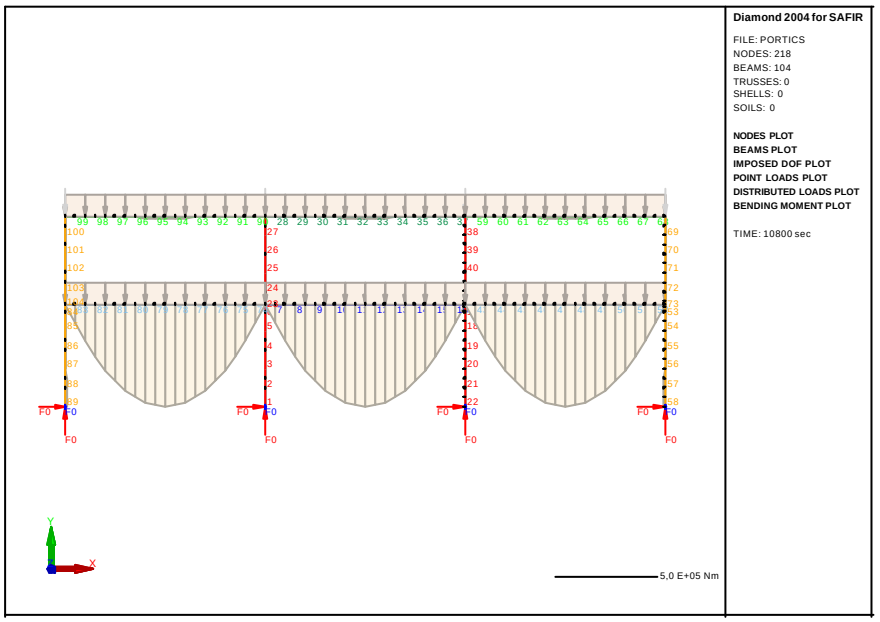


Fig.4-45 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.8.3 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL en el pórtico de esquina con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor y con perfil Z deslizante

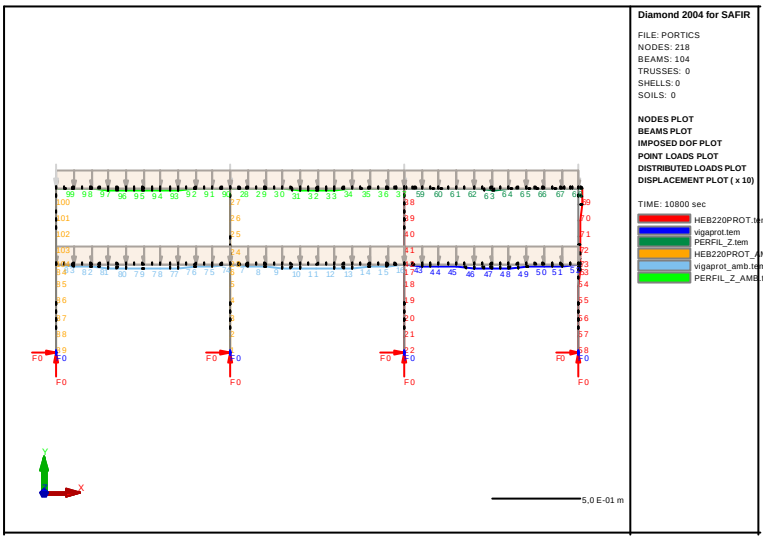


Fig.4-46 Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s. (3h)

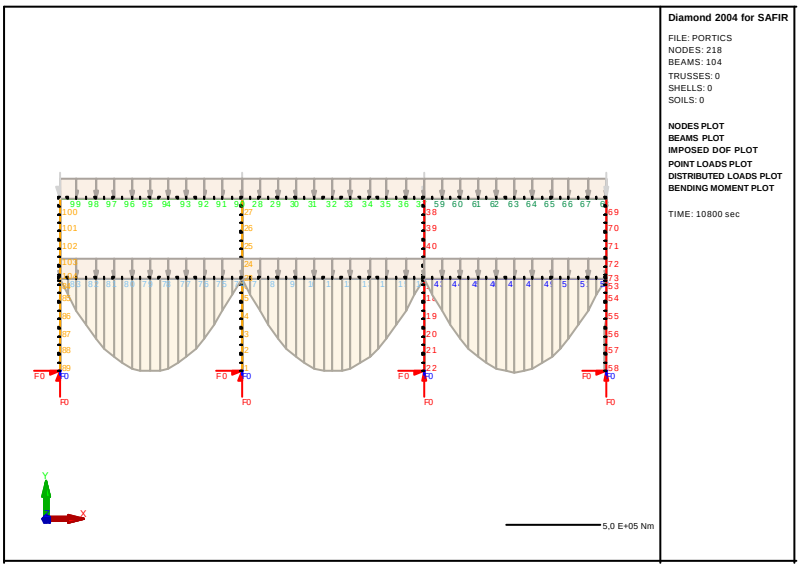


Fig.4-47 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

Se observa que no se produce el colapso de las naves TIPO al cabo de 3h gracias a la protección de vigas armadas y pilares con mortero Tecwool F de 30mm de espesor.

4.8.4 Análisis perfil Z deslizante con fuego NATURAL del caso "realista" en pórtico de esquina

N1 (esfuerzo horizontal) de los elementos BEAM 28, 32, 59, 68 y

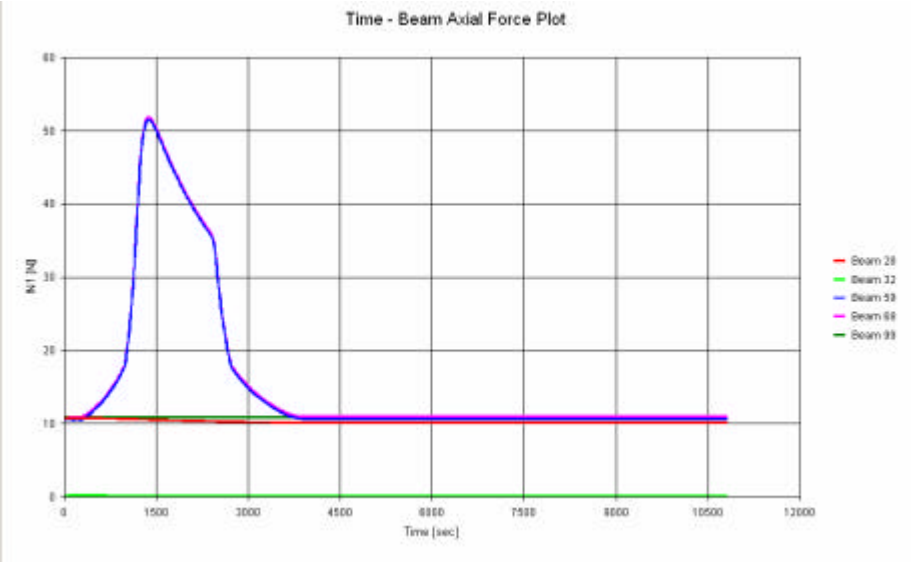


Fig.4-47 Análisis del esfuerzo horizontal del perfil Z deslizante para diferentes instantes de tiempo

N2 (esfuerzo vertical) de los elementos BEAM 28, 32, 59, 68 y 99:

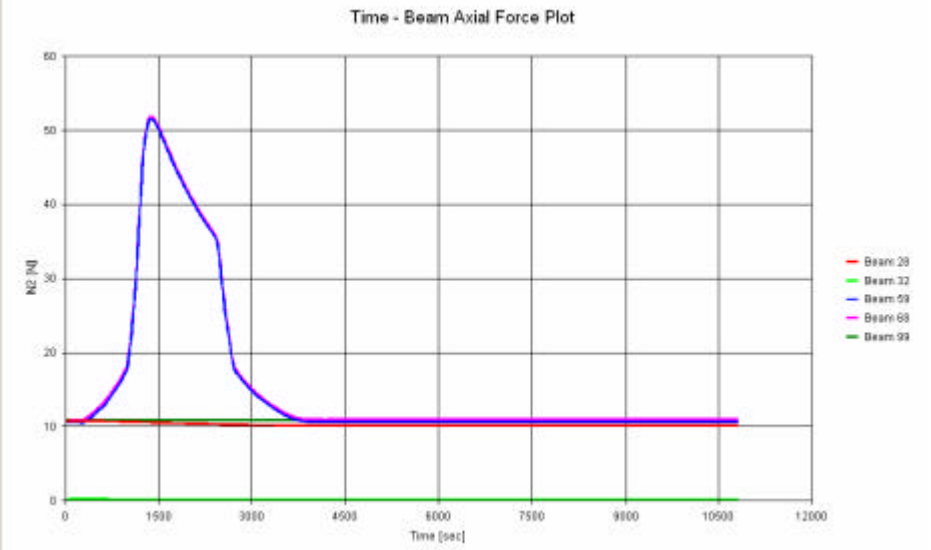


Fig.4-48 Análisis del esfuerzo vertical del perfil Z deslizante para diferentes instantes de tiempo

Se observa que, en la evolución de las fuerzas horizontales y verticales H-V o N1-N2 según los gráficos obtenidos con el programa DIAMOND, desde el instante 3985s se minimizan los esfuerzos dentro de la correa del perfil Z.

Estos gráficos de N1-tiempo, N2-tiempo nos permitirían hacer una eliminación "justificada" de la correa del perfil Z y de sus cargas para realizar el nuevo análisis de los 3985s a los 10800s.

Pero existe un inconveniente, el programa SAFIR2004 no permite realizar el análisis estático y dinámico a partir de un instante inicial cualquiera sino que sólo permite hacer el análisis con instante inicial 1s.

Por tanto se realiza el análisis estático y dinámico sin perfil Z a partir del instante inicial 1s hasta los 10800s.

4.8.5 Análisis perfil Z articulado con fuego NATURAL del caso "realista" en pórtico de esquina

N1 (esfuerzo horizontal) de los elementos BEAM 28, 32, 59, 68 y 99:

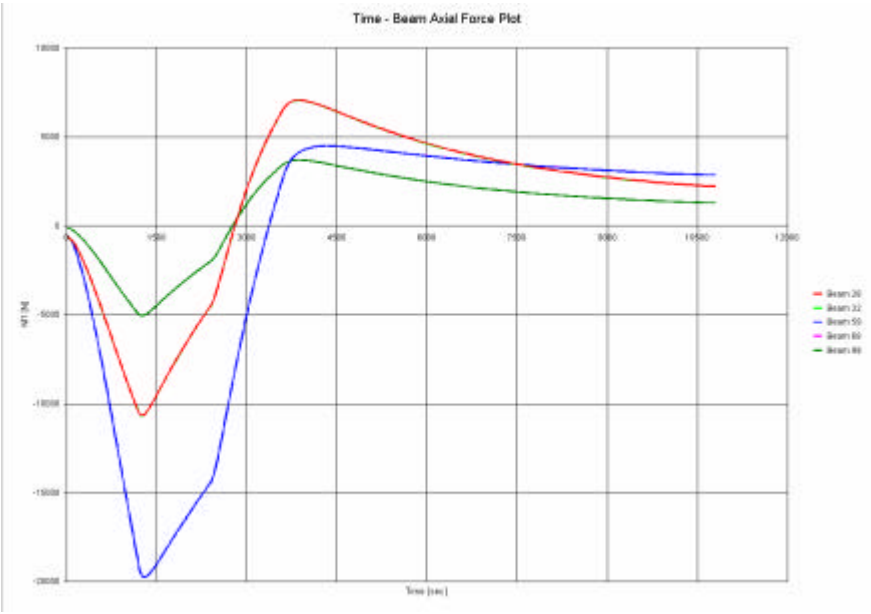


Fig.4-49 Análisis del esfuerzo horizontal del perfil Z articulado para diferentes instantes de tiempo

N2 (esfuerzo vertical) de los elementos BEAM 28, 32, 59, 68 y 99:

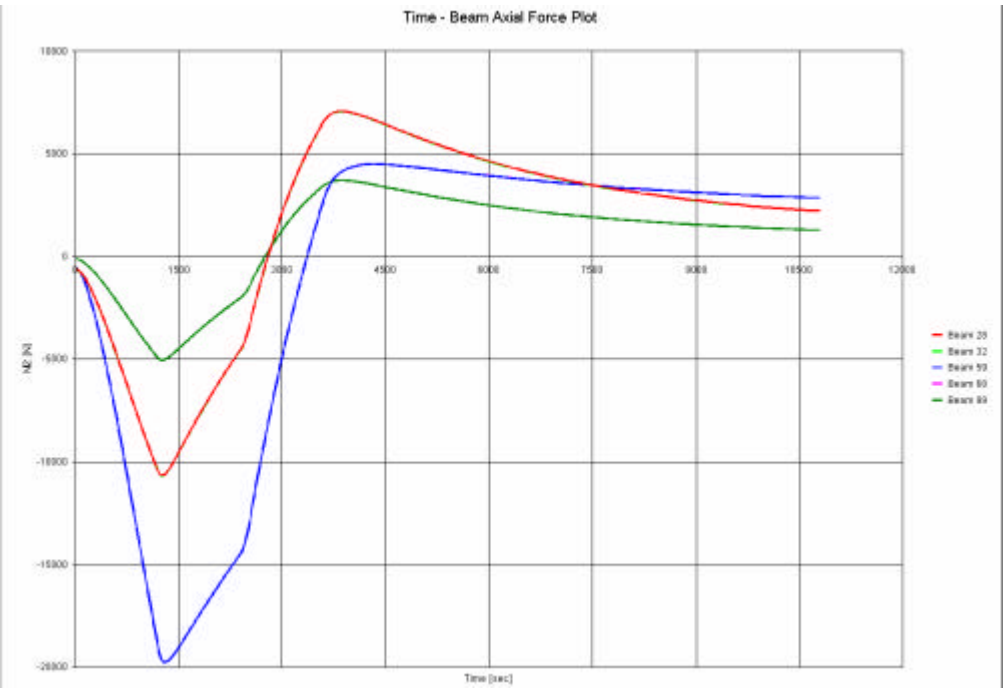


Fig.4-50 Análisis del esfuerzo vertical del perfil Z articulado para diferentes instantes de tiempo

Se observa que debido a las dilataciones que sufre el perfil Z de acero se observan primero compresiones, hasta los 2770s, y posteriormente las tracciones que sufre el elemento de acero.

4.9 Análisis de tres pórticos con fuego NATURAL del caso "realista" sin perfil Z en el sector de incendio

4.9.1 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso "realista" y sin perfil Z en el pórtico intermedio con vigas y pilares protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor.

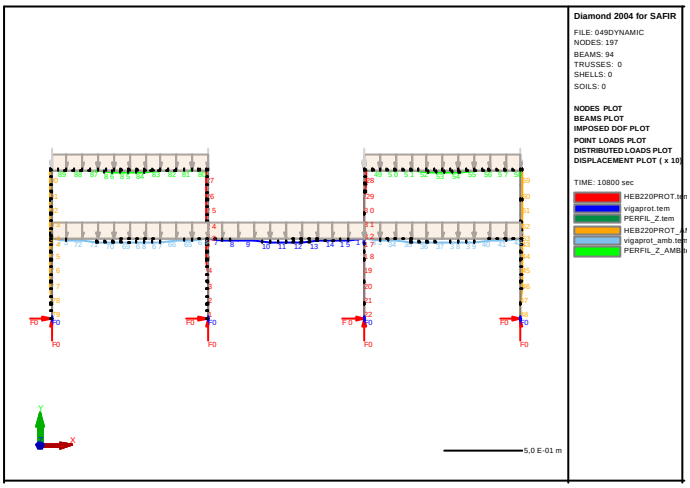


Fig.4-51 Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s (3h)

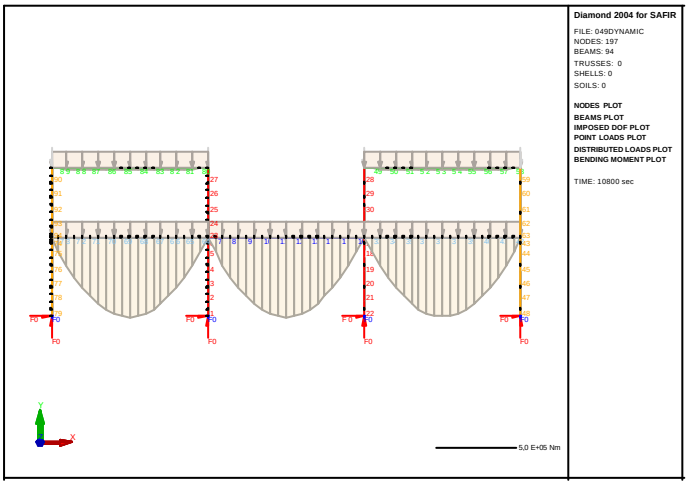


Fig.4-52 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.9.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” y sin perfil Z en el pórtico de esquina con vigas y pilares protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor.

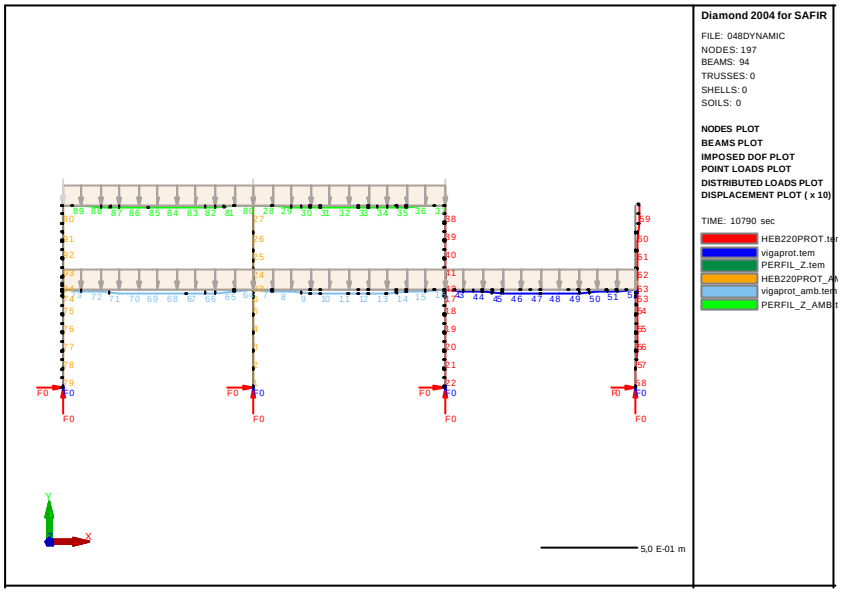


Fig.4-53 Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10790s. (2.99h)

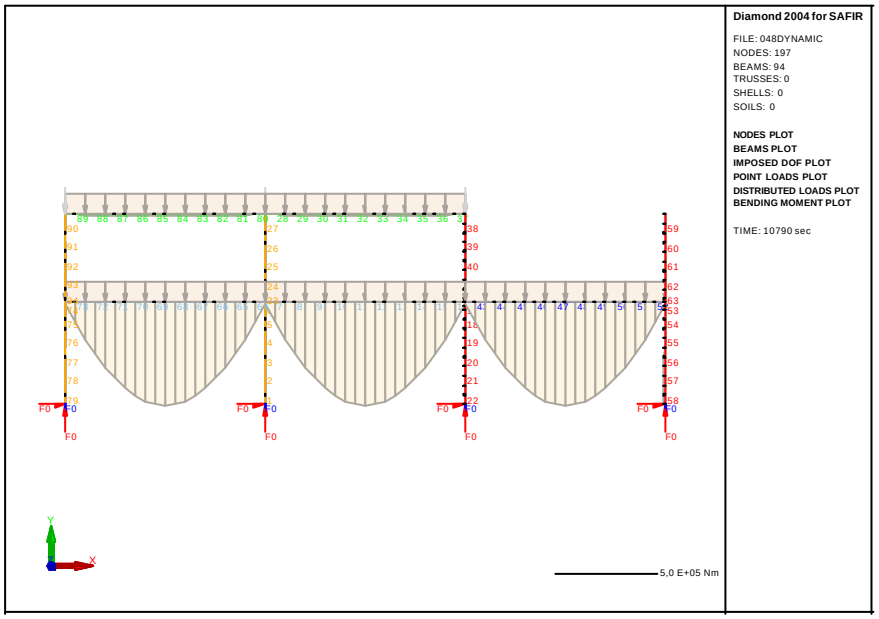
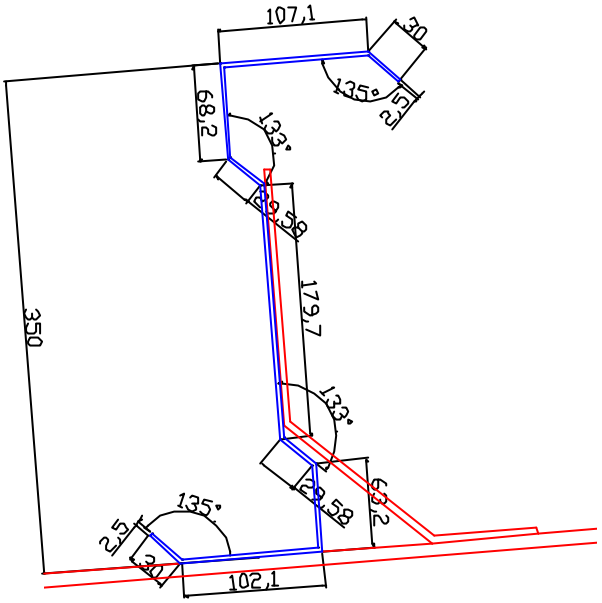


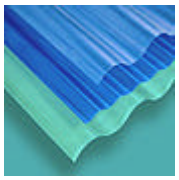
Fig.4-54 Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

4.10 Análisis de la cubierta

4.10.1 Perfiles en Z y placas de poliéster



En cuanto a la cubierta hay que destacar que está formada por vigas de clase 4 (elemento con sección de pared delgada), es decir por perfiles en Z que soportan placas de poliéster [9] que empiezan a fundirse y a perder sus propiedades mecánicas al alcanzar los 140ºC-150ºC.



Descripción y beneficios

Láminas de poliéster que se mantienen transparentes más tiempo.

Las láminas de poliéster Polylit® , están compuestas por una armadura de fibra de vidrio impregnada de resina de poliéster y protegida con un recubrimiento de gelcoat en ambas caras.

Principales ventajas de Polylit ®

- Fácil instalación
- Amplia gama de soluciones
- No sufre altas dilataciones

- Alta resistencia química
- Alta resistencia mecánica
- Alta resistencia al impacto
- Buena transmisión de la luz

Polylit® se fabrica con diversos grados de refuerzo de acuerdo con la norma EN1013-2.

	clase I	clase II	clase III	clase IV	
Características generales					
Contenido de fibra nominal	290	390	500	>600	g/m2
Espesor medio	0,8	1	1,3	1,7	mm

Polylit® puede fabricarse en dos variedades en cuanto a la reacción al fuego según norma UNE - 23727

- NORMALES Clasificación M4
- AUTOEXTINGUIBLES clasificadas M2 (placas de poliéster de la nave nido que se estudia)

En ambos casos las láminas de Polylit® no forman gotas inflamadas en su combustión.

4.10.2 Análisis térmico del perfil Z de cubierta sometido a fuego ISO

A continuación se genera el perfil Z metálico de acero según el eurocódigo3 (STEELC3). Se realiza una discretización por elementos finitos, generando primero los nodos y después los elementos formados por los correspondientes nodos. A partir del Programa Autocad se han podido generar todas las coordenadas de los nodos que forman el perfil Z.

Mediante el programa Autocad se pueden obtener las coordenadas Y y Z de cualquier nodo del perfil Z, con el fin de poder generar los nodos y elementos finitos de dicho perfil.

El perfil Z al no estar protegido hace que el análisis estático y dinámico de los tres pórticos no pueda avanzar más tiempo, ya que se produce el colapso de la correa (perfil Z).

Después de obtener la discretización por elementos finitos del perfil Z se realiza su análisis térmico mediante el programa SAFIR2004.

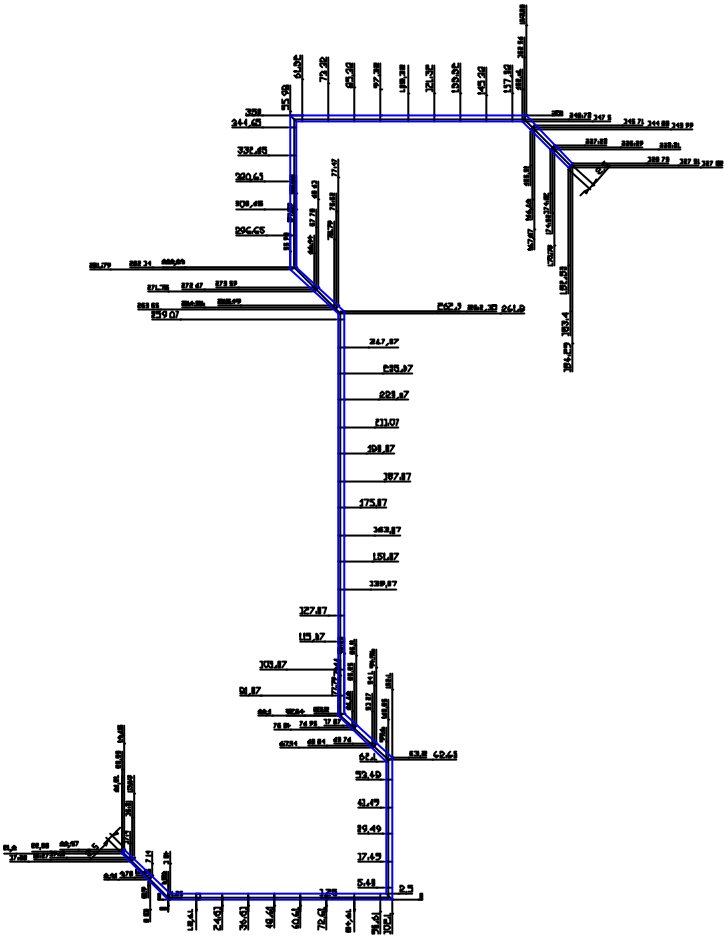


Fig.4-55 Coordenadas Y y Z de cada nodo del perfil Z obtenidas mediante el programa Autocad

Se genera el archivo PERFIL_Z.IN que se introducirá en el programa SAFIR para obtener el archivo PERFIL_Z.OUT, que nos da el resultado gráfico de la distribución de temperaturas en todo el perfil, y el archivo PERFIL_Z.TEM que nos da la temperatura en cada nodo.

El perfil Z se somete en todo su contorno a fuego ISO. El gráfico obtenido se realiza dentro de un margen de temperaturas, entre 150ºC y 850ºC.

Fig.4-56 Distribución de temperaturas del perfil Z sometido a fuego ISO en todo su contorno después de 3600s según programa Diamond.

Se observa que la temperatura máxima alcanzada por el perfil Z al cabo de 3600s es 944.3ºC.

4.10.3 Para-llamas de cubierta

Panelroc RF [10] es el producto que se utiliza como para-llamas de cubierta, puesto en horizontal y con un ancho total de 2mts (1m en cada nave). Fijado a la sectorización se mantiene íntegro durante 90 minutos (espesor 75mm). La RF de la divisória es de 180.

El para-llamas evita que el incendio de una nave nido se propague a la nave adyacente a través de la cubierta.

Información técnica panelroc RF:

Descripción Panelroc

Es un panel sándwich plano, constituido por un núcleo aislante de Lana de Roca intercalado entre dos láminas metálicas de recubrimiento, adherido a ellas mediante pegado con cola y fabricado en continuo.

Dimensiones

Estandars

• Anchura útil: 1.150 mm

• Espesores: 60, 75 y 100 mm (1)

• Longitudes: desde 2 hasta 10 m

Aplicación

Los paneles sándwich **Panelroc**, por las características especiales de su núcleo aislante, están concebidos para la ejecución de cerramientos, falsos techos y divisorias RF en sectorización contra incendios de edificios industriales, comerciales y de ocio. Además de su excelente comportamiento al fuego (hasta RF-180), la variedad de recubrimientos y revestimientos, permiten su aplicación respondiendo a cualquier exigencia definida en el proyecto de la obra: resistencia térmica, resistencia acústica, resistencia a ambientes agresivos, resistencia mecánica, estética, etc.

Composición

Núcleo aislante

Placas rígidas incombustibles de Lana de Roca volcánica, impregnada con resinas fenólicas termoendurecibles.

Su estructura fibrosa multidireccional proporciona al panel sándwich unas excelentes prestaciones en aislamiento acústico.

Cola

Cola bicomponente a base de poliol e isocianato, que garantiza la integridad de los paneles sándwich **Panelroc**.

Láminas de recubrimiento

Chapa de acero de 0,5 ó 0,6 mm de espesor, galvanizada en caliente según Norma EN 10147, Z 225 ó 275, conformada mediante un micronervado de 1 mm de relieve, en franjas longitudinales de 100 mm (opcional: acabado liso, sin conformar, para espesor 0,6 mm). Revestida en su cara interna por imprimación resina epoxi de 7-12 micras y en su

cara expuesta por imprimación resina epoxi de 5 micras + acabado prelacado con resina de poliéster silicona de 25 micras.

Consultar al departamento comercial de Knauf Insulation otras opciones de recubrimientos: Aluminio, cobre, acero inoxidable, acero galvanizado, etc.

Ensamblaje

La unión entre paneles se realiza mediante machihembrado por ambas caras. Opcionalmente, el panel sándwich **Panelroc** RF-180, de 100 mm de espesor nominal, puede incorporar un taco continuo de yeso Knauf Fireboard en su junta, a colocar en obra.

5 Modelos de cálculo simplificado

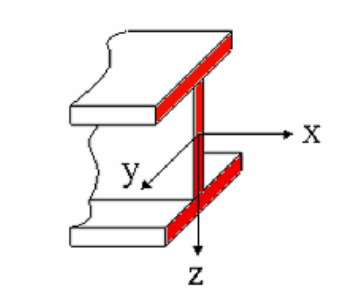
Son métodos de cálculo simplificados para elementos individuales (vigas y pilares), los cuales se fundamentan en hipótesis conservadoras, fundamentalmente en la norma europea Eurocódigo3, parte 1-2 “Estructuras expuestas al fuego” [1].

La Norma EN 1993-1-2 describe los principios, requisitos y reglas para el cálculo estructural en edificios de estructura de acero expuestos al fuego, incluyendo los siguientes aspectos: requisitos de seguridad, procedimientos de cálculo y herramientas de cálculo.

5.1 Cálculo estructural frente al fuego, modelos de cálculo simplificados

5.1.1 Generalidades

Tanto para HE220B como para la viga armada se tiene:



Con el programa CLASE se pueden definir los perfiles HEB220 y VIGA ARMADA, este programa nos permite obtener datos para realizar los modelos de cálculo simplificado:

- La clasificación de una sección de un perfil según el eurocódigo 3
- Características mecánicas de la sección bruta y eficaz

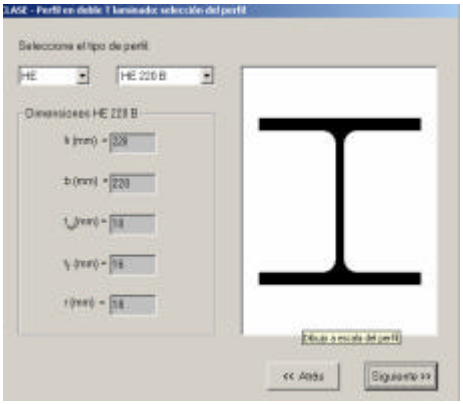
Para realizar el método de cálculo simplificado se necesita saber a que clase pertenecen los perfiles HEB220 y viga armada

Con el programa CLASE se obtiene:

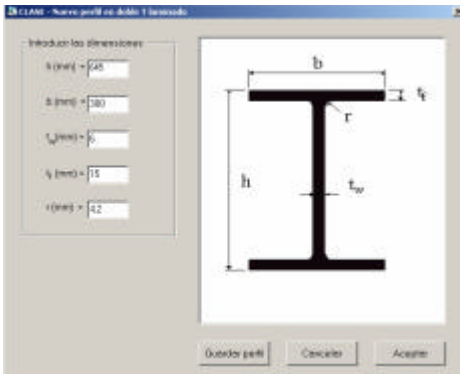
- Pilar HEB220 sección de clase 1

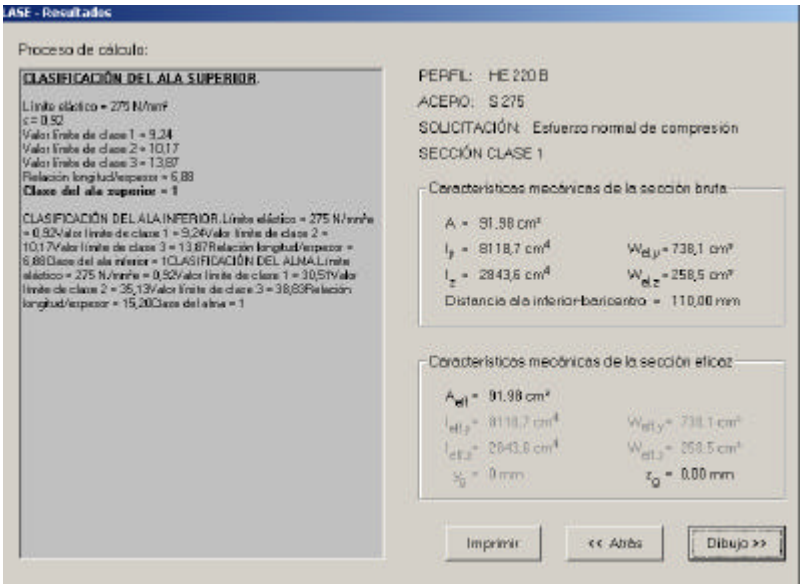
- Viga armada sección de clase 3

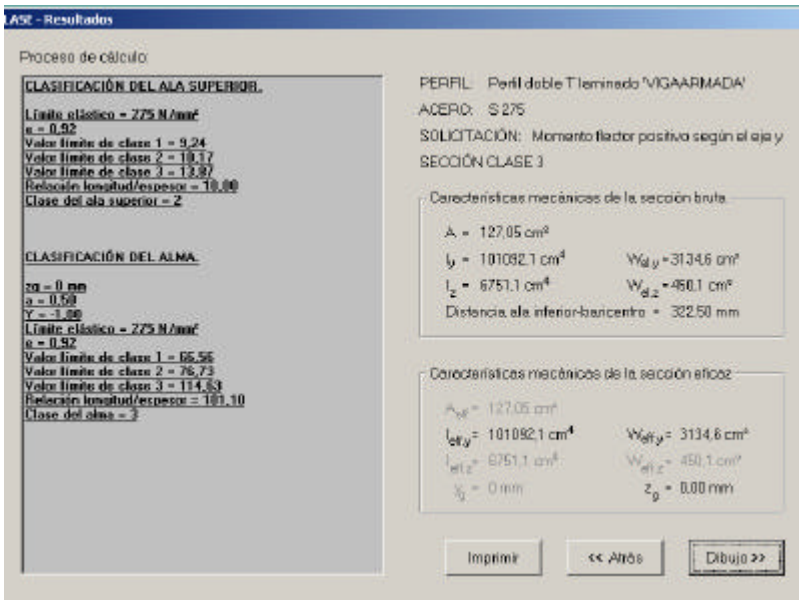
HEB220



VIGA ARMADA







5.2 Determinación de la protección de la viga armada que sustenta el altillo (placa alveolar 200+50)

5.2.1 Dimensionado por resistencia

<u>- Características de la viga armada:</u>

Acero S275: f_Y = 2750 kg / cm^2

Separación entre vigas: S = 5.478 m

Longitud de la viga del pórtico: L = 9.805 m

Dimensiones de la viga: h = 645 mm, b = 300 mm, t_W = 6 mm, t_f = 15 mm, r = 4.2 mm

Peso propio: G_K = 16.71 KN/m

Sobrecarga: Q_K = 27.39 KN/m

Módulo plástico: $W_{el,Y}$ = 3134.6 cm^3 (resultado obtenido con el programa CLASE)

Área: A = 127.05 cm^2 (resultado obtenido con el programa CLASE)

<u>- Carga de cálculo del forjado:</u>

$$q = g_G \cdot G_K + g_{Q,1} \cdot Q_{K,1} = 1.35 \cdot 16.71 + 1.5 \cdot 27.39 = 63.6435 \frac{KN}{m}$$

$g_G = 1.35$ coeficiente de seguridad para acciones gravitatorias

$g_{Q,1} = 1.5$ coeficiente de seguridad para sobrecarga

<u>- En caso de fuego accidental la carga es:</u>

- Caso de incendio en almacén del altillo:

$$q_{fi,d} = g_{fi} \cdot G_K + \Psi_{fi} \cdot Q_{K,1} = 1 \cdot 16.71 + 0.9 \cdot 27.39 = 41.361 \frac{KN}{m}$$

- Caso de incendio en zona administrativa del altillo:

$$q_{fi,d} = g_{fi} \cdot G_K + \Psi_{fi} \cdot Q_{K,1} = 1 \cdot 16.71 + 0.5 \cdot 27.39 = 30.405 \frac{KN}{m}$$

<u>- Efecto flector:</u>

$M_d = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 63.6435 \cdot (9.805)^2 = 764.82 KNm$ en centro de la viga

<u>- Efecto flector en situación de fuego:</u>

$$M_{fi,Ed} = \frac{1}{8} \cdot q_{fi,d} \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 41.361 \cdot (9.805)^2 = 497.046 KNm$$

5.2.2 Cálculo de la protección al fuego

<u>- Coeficiente de reducción ?$_{fi}$ para la combinación de cargas:</u>

$g_{fi} = 1$ en situación de fuego accidental

$\frac{Q_{K,1}}{G_K} = \frac{27.39}{16.71} = 1.64$ relación de carga

$y_{1,1} = y_{fi} = 0.9$ en caso más desfavorable, para el caso de incendio de almacén sobre el altillo.

$$h_{fi} = \frac{g_{fi} \cdot G_K + y_{fi} \cdot Q_{K,1}}{g_G \cdot G_K + g_{Q,1} \cdot Q_{K,1}} = \frac{41.361}{63.6435} = 0.65$$

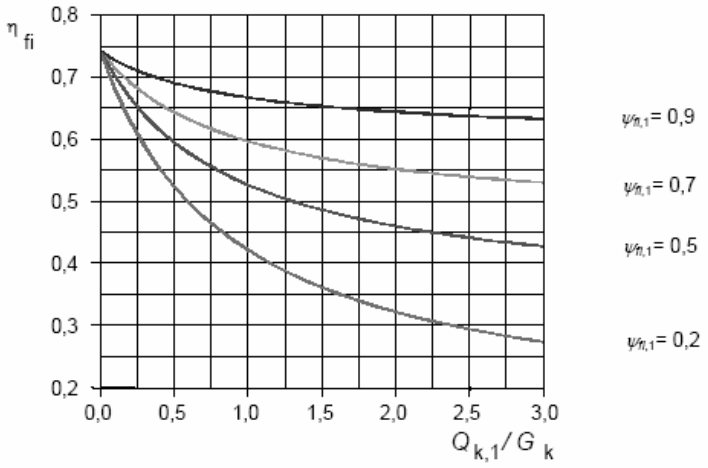
$$h_{fi} = \frac{M_{fi,Ed}}{M_d} = \frac{41.361}{63.6435} = 0.65$$

$y_{1,1} = y_{fi} = 0.5$ para el caso de incendio de zona administrativa sobre el altillo.

$$h_{fi} = \frac{g_{fi} \cdot G_K + y_{fi} \cdot Q_{K,1}}{g_G \cdot G_K + g_{Q,1} \cdot Q_{K,1}} = \frac{1 \cdot 16.71 + 0.5 \cdot 27.39}{1.35 \cdot 16.71 + 1.5 \cdot 27.39} = \frac{30.405}{63.6435} = 0.48$$

Los resultados obtenidos $h_{fi} = 0.65$ y $h_{fi} = 0.48$ coinciden con el gráfico variación del coeficiente de reducción ?$_{fi}$ con la relación de carga $\frac{Q_{K,1}}{G_K}$:

EN 1993-1-2:2005 (E)



El valor de $y_{1,1} = y_{fi}$ también puede obtenerse de la tabla de los coeficientes de simultaneidad (y) del CTE (Código Técnico de la Edificación) parte 2 DB SE (Documento Básico Seguridad Estructural) [7].

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

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

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

<u>- Resistencia al fuego del perfil de la viga armada:</u>

- Para temperatura uniforme en sección:

$$M_{fi,t,Rd(t=0)} = \frac{f_Y}{g_{M,fi}} \cdot W_{pl,Y} = \frac{275\frac{N}{mm^2}}{1} \cdot 3134.6 \cdot 10^3 mm^3 = 862015000 Nmm = 862.015 KNm$$

$M_{fi,t,Rd(t=0)} =$ valor de cálculo del momento resistido para el instante t

- Para temperatura no uniforme en sección:

Sección transversal de la viga armada expuesta al fuego por sus cuatro caras:

K_1= factor de adaptación para distribuciones de temperatura no uniformes en la sección transversal;

K_2= factor de adaptación para distribuciones de temperatura no uniformes a lo largo de la viga.

para la sección transversal de la viga armada que se está estudiando debe ser: K_1=1.0

K_1=1.0 para una viga expuesta en sus cuatro caras.

K_1=0.7 para una viga sin protección expuesta en tres de sus caras, con un forjado mixto o de hormigón en su cuarta cara.

K_1=0.85 para una viga protegida expuesta en tres de sus caras, con un forjado mixto o de hormigón en su cuarta cara.

A lo largo de la viga, el factor de adaptación K_2 debe adoptar el siguiente valor: K_2=1.0

K_2=0.85 en los apoyos de una viga hiperestática.

K_2=1.0 en todos los casos en todos los demás casos.

$$M_{fi,q_{\max},R_d} = \frac{f_Y \cdot W_{pl,Y}}{K_1 \cdot K_2} = \frac{275 \cdot 3134.6 \cdot 10^3}{1 \cdot 1} = 862015000 Nmm = 862.015 KNm$$

<u>- Grado de utilización del perfil:</u>

$M_{fi,Ed} =$ momento de cálculo del efecto de las acciones para la situación de fuego.

$M_{fi,q_{\max},R_d} =$ el valor de cálculo del momento resistido de la sección transversal para una temperatura ?$_{max}$.

$$m_0 = \frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,t,R_d\,(t=0)}} = \frac{497.046}{862.015} = 0.58$$

<u>- Temperatura crítica del acero:</u>

Según tabla 4.1 de la EN 1993-1-2:2005 (E) (Eurocódigo 3. Parte 1-2) para un grado de utilización $m_0 = 0.58$ de la viga armada se tiene que su temperatura crítica es de $q_{a,cr}$ = 560ºC.

$q_{a,cr}$ = Temperatura crítica del acero.

También puede utilizarse el método de la temperatura crítica para vigas arriostradas:

$$q_{a,cr} = 39.19 \ln\left[\frac{1}{0.9674 m_0^{3.833}} - 1\right] + 482$$

donde m_0 no debe ser inferior a 0.013

EN 1993-1-2:2005 (E)

Tabla 4.1: Temperatura crítica $\theta_{a,cr}$ para diversos valores del grado de utilización μ_0

μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

NOTA: En el anexo nacional se pueden obtener los valores por defecto de las temperaturas críticas.

<u>- Factor de sección de la viga armada:</u>

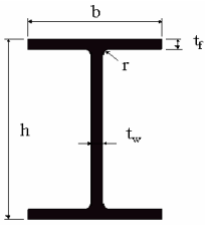
A_p/V = es el factor de sección para elementos de acero protegidos mediante material de protección frente al fuego.

Área de la viga armada: A = 127.05 cm^2 = V

$$A_p/V = \frac{Perímetro}{Superfície\ de\ la\ sección\ transversal} = \frac{2b + 4t_f + 2\cdot(b - t_w) + 2\cdot(h - 2\cdot t_w)}{A} = 190.47 m^{-1}$$

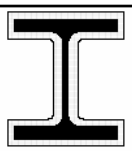
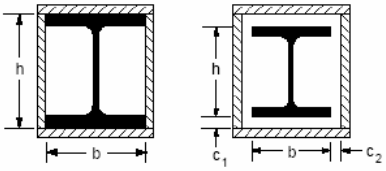
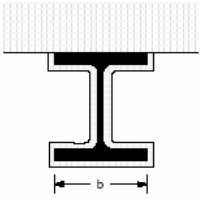
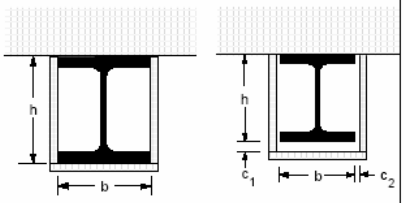
Dimensiones viga armada:

h = 645 mm, b = 300 mm, t_W = 6 mm, t_f = 15 mm, r = 4.2 mm



EN 1993-1-2:2005 (E)

Tabla 4.3: Factor de sección A_p/V para elementos de acero aislados mediante material de protección frente al fuego

Diseño	Descripción	Factor de sección (A_p/V)
	Revestimiento de contorno con espesor uniforme	$\frac{\text{perímetro de acero}}{\text{superficie de la sección transversal de acero}}$
	Revestimiento hueco con espesor uniforme)[1]	$\frac{2(b+h)}{\text{superficie de la sección transversal de acero}}$
	Revestimiento de contorno con espesor uniforme, expuesto al fuego en tres de sus caras	$\frac{\text{perímetro de acero} - b}{\text{superficie de la sección transversal de acero}}$
	Revestimiento hueco con espesor uniforme, expuesto al fuego en tres de sus caras)[1]	$\frac{2h+b}{\text{superficie de la sección transversal de acero}}$

)[1] Las dimensiones de la holgura c_1 y c_2, por lo general, no deberían ser superiores a $h/4$

<u>-Tipo de protección:</u>

Mortero Tecwool F. Protección contra el fuego y absorción acústica [8].

l_p = la conductividad térmica del sistema de protección frente al fuego.

l_p = 0.044W/mºC

<u>- Determinación del espesor de la protección:</u>

- Viga armada sin proteger

Elementos internos de acero sin protección [1]

Para una distribución uniforme equivalente de la temperatura en la sección transversal, el aumento de temperatura ??a,t en un elemento de acero sin protección durante un intervalo de tiempo ?t debería determinarse con:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh}\frac{A_m/V}{c_a\,\rho_a}\dot{h}_{net}\Delta t$$

donde:

k_{sh} es el factor de corrección del efecto sombra;

A_m/V es el factor sección para elementos de acero sin protección [1/m];

A_m es la superficie del elemento por unidad de longitud [m²/m];

V es el volumen del elemento por unidad de longitud [m³/m];

c_a es el calor específico del acero, dado en el apartado 3 [J/kgK];

$\dot{h}_{net}$ es el valor de cálculo del flujo neto de calor por unidad de superficie [W/m2];

Δt es el intervalo de tiempo [segundos];

r_a es la densidad del acero [kg/m3].

Para perfiles de secciones abiertas sometidas a las acciones de un fuego nominal, el factor de corrección del efecto sombra puede determinarse como:

$k_{sh} = 0.9\ [A_m/V]_b/[A_m/V]$

donde:

$[A_m/V]_b$ es el valor cajeado del factor sección

En todos los demás casos, el valor de k_{sh} debería tomarse como:

$k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V]$

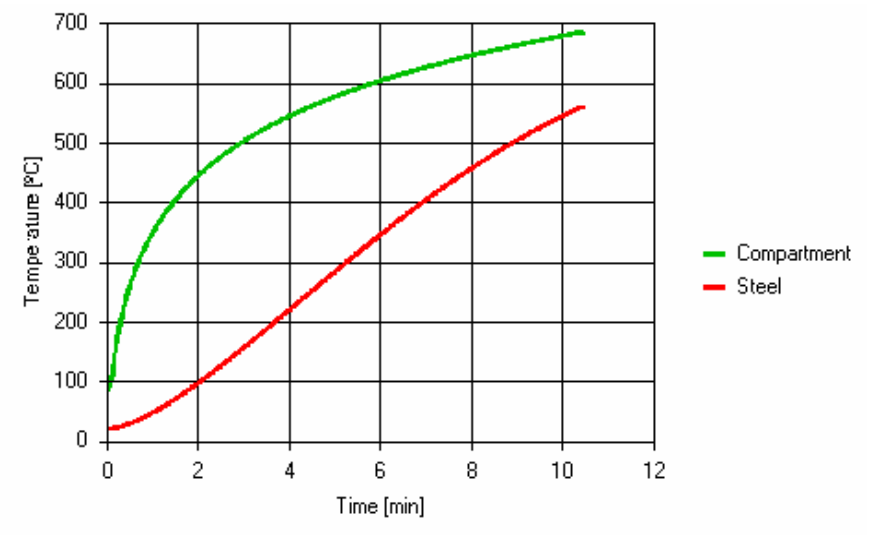
NOTA: Para secciones transversales con forma convexa (por ejemplo, secciones huecas rectangulares o circulares) completamente envueltas por el fuego, el efecto sombra no interviene y, en consecuencia, el factor de corrección k_{sh} equivale a la unidad.

Con el programa ELEFIR EN V1.0 según EN 1993-1-2:2005 se puede obtener el gráfico tiempo-temperatura del perfil de la viga armada (Steel) comparado con el gráfico tiempo-temperatura de la curva estándar de fuego ISO834 (Compartment)

Se introducen en el programa como datos:

$q_{a,cr}$ =560ºC y $A_p / V = {}^{A_m}\!/_{A} = 190.47m^{-1} \approx 190.5m^{-1}$

y se obtiene el siguiente gráfico:



Por tanto para la viga armada sin proteger se observa que:

$A_p / V = {}^{A_m}\!/_{A} = 190.47m^{-1} \approx 190.5m^{-1}$, $q_{a,cr}$ =560ºC. $\rightarrow$ La viga armada tiene una R-10 (10 minuts).

Según el RSIEI [2] se tiene que cumplir que la viga armada tenga una R-60 (60 minutos) como mínimo para caso de establecimiento industrial tipo B sobre rasante y nivel de riesgo intrínseco bajo. Por tanto para aumentar la R de la viga se decide proteger con mortero Tecwool F con un espesor de $d_p = 10$mm.

- viga armada protegida con mortero Tecwool F de $d_p = 10$mm de espesor.

Elementos internos de acero aislados mediante material de protección frente al fuego [1]

Para una distribución de temperatura uniforme en una sección transversal, el incremento de temperatura ??$_{a,t}$ de un elemento aislado de acero durante un intervalo de tiempo ?t debería obtenerse con:

$$\Delta q_{a,t} = \frac{l_p A_p / V}{d_p c_a r_a} \cdot \frac{(q_{g,t} - q_{a,t})}{(1 + f/3)} \cdot \Delta t - (e^{f/10} - 1) \cdot \Delta q_{g,t} \quad \text{(pero } \Delta q_{a,t} \geq 0 \text{ si } \Delta q_{g,t} > 0\text{)}$$

con:

$$f = \frac{c_p r_p}{c_a r_a} \cdot d_p \cdot A_p / V$$

donde:

A_p /V es el factor de sección para elementos de acero protegidos mediante material de protección frente al fuego;

A_p es la superficie pertinente del material de protección frente al fuego por unidad de longitud del elemento [m²/m];

V es el volumen del elemento por unidad de longitud [m³/m];

c_a es el calor específico del acero, dependiente de la temperatura [J/kgK];

c_p es el calor específico del material de protección frente al fuego, independientemente de la temperatura [J/kgK];

d_p es el espesor del material de protección frente al fuego [m];

Δt es el intervalo de tiempo [segundos];

$q_{a,t}$ es la temperatura del acero en el instante t [°C];

$q_{g,t}$ es la temperatura del gas ambiental en el instante t [°C];

$\Delta q_{g,t}$ es el incremento de la temperatura del gas ambiental durante el intervalo de tiempo ?t [K];

l_p es la conductividad térmica del sistema de protección frente al fuego [W/mK];

r_a es la densidad del acero, dada en el apartado 3 [kg/m3];

r_p es la densidad del material de protección frente al fuego [kg/m3].

El valor de Δt no debería ser superior a 30 segundos.

La superficie A_p del material de protección frente al fuego debería equivaler, por lo general, al área de su superficie interna, sin embargo, para revestimientos huecos con holgura alrededor del elemento de acero, puede tomarse el mismo valor que se usa para revestimientos huecos sin holgura.

Para la mayoría de los materiales de protección frente al fuego, el cálculo del incremento de temperatura del acero Δq_a puede modificarse para tener en cuenta un retardo temporal en el aumento de la temperatura del acero cuando ésta alcanza 100 °C. Este tiempo de retardo debería determinarse mediante un método de acuerdo con la Norma UNE - ENV 13381-4.

Protección de mortero Tecwool F:

Conductividad térmica: $l_p = 0.044 \, {}^{W}\!/_{m^o C}$

Espesor: $d_p = 10 mm$

Densidad: $r_p = 250 \, {}^{Kg}\!/_{m^3}$

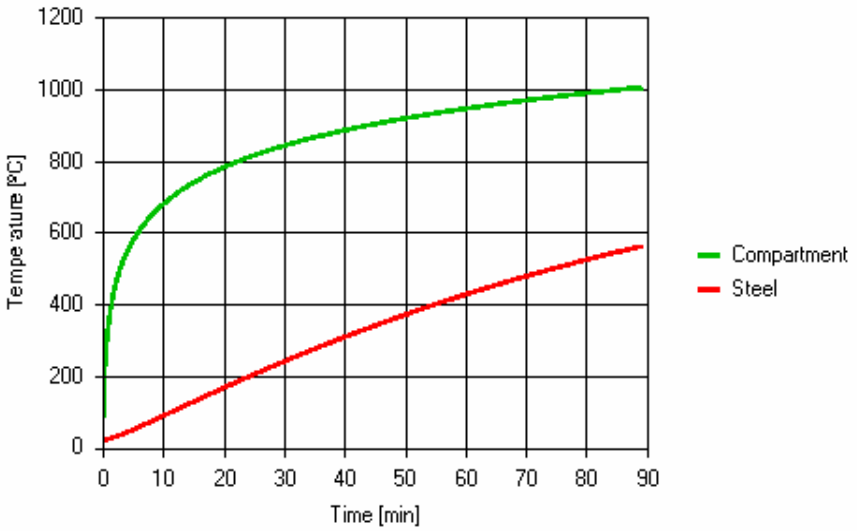
Calor específico: $C_p = 1 \, {}^{J}\!/_{KgK}$ (caso más desfavorable, ya que el programa no te permite poner 0)

Por tanto para la viga armada protegida se observa que:

$$A_p / V = \frac{Perímetro}{Superfície\, de\, la\, \text{sec}ción\, transversal} = \frac{2b + 4t_f + 2 \cdot (b - t_w) + 2 \cdot (h - 2 \cdot t_w)}{A} = 190.47 m^{-1}$$

Con el programa ELEFIR EN V1.0 según EN 1993-1-2:2005 se observa:

$A_p / V = {}^{A_m}\!/_{A} = 190.47 m^{-1}, d_p = 10 mm$, $q_{a,cr}$ =560ºC. $\rightarrow$ La viga armada tiene una R-89 (89 minuts).



Según el RSIEI [2] se tiene que cumplir que la viga armada tenga una R-60 (60 minutos) como mínimo para caso de establecimiento industrial tipo B sobre rasante y nivel de

riesgo intrínseco bajo. Por tanto al proteger la viga con mortero Tecwool F con un espesor de $d_p = 10$mm se consigue una R-89 superior a la requerida en el RSIEI.

- viga armada protegida con mortero Tecwool F de $d_p = 30$mm de espesor.

Protección de mortero Tecwool F:

Conductividad térmica: $l_p = 0.044 \, W/m^{o}C$

Espesor: $d_p = 30mm$

Densidad: $r_p = 250 \, Kg/m^3$

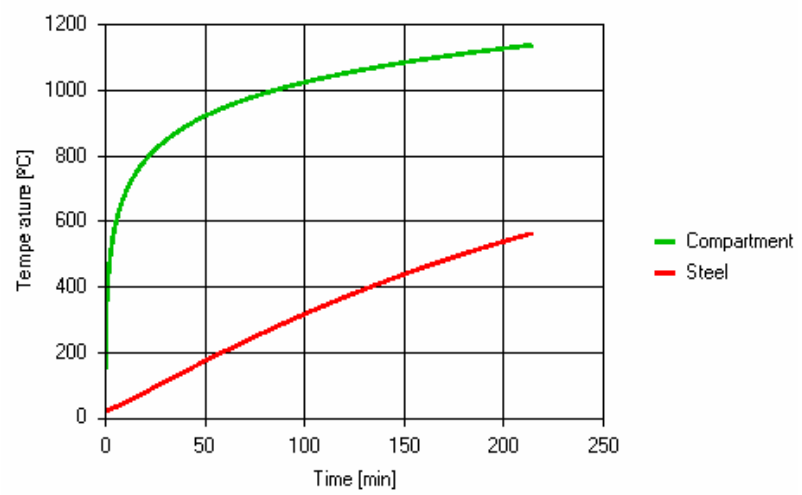
Calor específico: $C_p = 1 \, J/KgK$ (caso más desfavorable)

Factor de forma o de sección de la viga armada:

$$A_p / V = \frac{Perímetro}{Superfície\ de\ la\ sección\ transversal} = \frac{2b + 4t_f + 2 \cdot (b - t_w) + 2 \cdot (h - 2 \cdot t_w)}{A} = 190.47 m^{-1}$$

Según el programa ELEFIR EN V1.0 se observa:

$A_p / V = A_m / A = 190.47 m^{-1}$, $d_p = 30mm$, $q_{a,cr}$ =560ºC. $\rightarrow$ La viga armada tiene una R-214 (214 minuts).



Se cumple perfectamente con el RSIEI [2], con la viga armada protegida con mortero Tecwool F con un espesor de $d_p = 30$mm la nave TIPO está en situación de nivel de riesgo intrínseco alto, en establecimiento industrial tipo B y en planta sobre rasante.

<u>- Tiempo exigible de protección:</u>

Según el RSIEI para la viga armada que sustenta el altillo se tiene:

Estabilidad al fuego de elementos estructurales portantes:

Nivel de riesgo intrínseco	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante
BAJO	R 120 *(EF – 120)*	R 90 *(EF – 90)*	R 90 *(EF – 90)*	R 60 *(EF – 60)*	R 60 *(EF – 60)*	R 30 *(EF – 30)*
MEDIO	NO ADMITIDO	R 120 *(EF – 120)*	R 120 *(EF – 120)*	R 90 *(EF – 90)*	R 90 *(EF – 90)*	R 60 *(EF – 60)*
ALTO	NO ADMITIDO	NO ADMITIDO	R 180 *(EF -180)*	R 120 *(EF -120)*	R 120 *(EF -120)*	R 90 *(EF – 90)*

Máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio:

Riesgo intrínseco del sector de incendio		Configuración del establecimiento		
		TIPO A (m²)	TIPO B (m²)	TIPO C (m²)
BAJO		(1)-(2)-(3)	(2) (3) (5)	(3) (4)
	1	2000	6000	SIN LÍMITE
	2	1000	4000	6000
MEDIO		(2)-(3)	(2) (3)	(3) (4)
	3	500	3500	5000
	4	400	3000	4000
	5	300	2500	3500
ALTO			(3)	(3)(4)
	6		2000	3000
	7	NO ADMITIDO	1500	2500
	8		NO ADMITIDO	2000

La nave TIPO de estudio es de 155m^2 por tanto para establecimiento industrial tipo A no está permitido un nivel de riesgo intrínseco del sector de incendio alto, en cambio si se permite riesgo intrínseco alto en caso de que la nave TIPO sea de tipo B. Se considera como caso caso “realista” un nivel de riesgo intrínseco medio, ya que nivel de riesgo alto sólo se da en casos muy excepcionales, con densidades de carga de fuego muy elevadas.

Nivel de riesgo intrínseco en función de la densidad de carga de fuego ponderada y corregida:

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m²	MJ/m²
BAJO	1	$Q_S \leq 100$	$Q_S \leq 425$
	2	$100 < QS \leq 200$	$425 < Q_S \leq 850$
MEDIO	3	$200 < Q_S \leq 300$	$850 < Q_S \leq 1275$
	4	$300 < Q_S \leq 400$	$1275 < Q_S \leq 1700$
	5	$400 < Q_S \leq 800$	$1700 < Q_S \leq 3400$
ALTO	6	$8005 < Q_S \leq 1600$	$3400 < Q_S \leq 6800$
	7	$1600 < Q_S \leq 3200$	$6800 < Q_S \leq 13600$
	8	$3200 < Q_S$	$13600 < Q_S$

5.3 Comprobación de la capacidad portante del pilar HEB220 protegido, sometido a compresión

Se trata de comprobar que los pilares HEB220 de la nave industrial tipo (nave nido), protegidos con mortero Tecwool F ($?_p$=0.044W/mK) y espesor d_p=30mm, con débil impedimento de dilatación, aguanten la estructura de la nave.

5.3.1 Datos del pilar HEB220

Área: A = 91.98cm^2

Módulo plástico: $W_{pl,Y}$ = 831.5cm^3 (resultado obtenido con el programa CLASE)

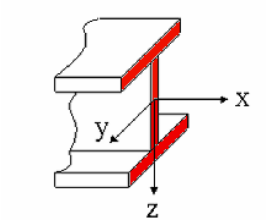
Altura: L = 9.257m

Acero S275: f_Y=2750Kg/cm^2

$$g_{M1} = g_{M,fi} = 1$$

Radio de giro de la sección respecto a eje Y: i_Y = 9.43cm (de tabla de perfiles HEB)

Radio de giro de la sección respecto a eje Z: i_Z = 5.59cm (de tabla de perfiles HEB)



Pilar HEB220 sección de clase 1 (obtenido mediante programa CLASE)

$$e = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.92$$

Dimensiones del pilar: H = 220 mm, b = 220 mm, t_W = 10 mm, t_f = 16 mm, r = 18 mm

<u>- Solicitación principal de cálculo:</u>

Para la nave nido de estudio las cargas axiles que soporta el pilar son:

Nieve: 0.80 KN/m^2

Peso propio cubierta: 0.23 KN/m^2

Luz del pórtico: L=10m

Distancia entre pilares: S_1=9.222m, S_2=5.478m

$$S = \frac{S_1}{2} + \frac{S_2}{2} = \frac{9.222}{2} + \frac{5.478}{2} = 7.35m$$

Distancia entre perfiles Z: d=1.58m

Longitud de la viga armada: L'=9.805m

El valor de $y_1 = y_{fi}$ se obtiene de la tabla 4.2 de los coeficientes de simultaneidad (y) del CTE (Código Técnico de la Edificación) parte 2 DB SE (Documento Básico Seguridad Estructural) [7].

En situación de fuego accidental de la tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (y):

$y_1 = y_{fi} = 1$ para el peso propio de cubierta

$y_1 = y_{fi} = 0.2$ para la carga de nieve para altitudes = 1000m

<u>- Cálculo manual del esfuerzo axil:</u>

$$N = 0.23\frac{KN}{m^2}(L \cdot S) + 0.2 \cdot 0.80\frac{KN}{m^2} \cdot (L \cdot S) = 0.23 \cdot (10 \cdot 7.35) + 0.2 \cdot 0.80 \cdot (10 \cdot 7.35) =$$
$$= 28.665KN$$

<u>- Carga que soporta el perfil Z de cubierta:</u>

$$q = (1 \cdot 0.23 + 0.2 \cdot 0.80) \cdot d = 0.39 \cdot 1.58 = 0.6162\frac{KN}{m}$$

Si dicho pilar HEB220 es un pilar compartido con la nave TIPO adyacente el esfuerzo axil en la cabeza del pilar que se entra en el programa SAFIR2004 es:

$$2N_{sd} = 2 \cdot \left(N - q \cdot \frac{L}{2}\right) = 2 \cdot \left(28.665 - 0.6162 \cdot \frac{10}{2}\right) = 51.168KN$$

$$M_{y\,sd} = 0$$

En el caso de tener un pilar extremo que no es compartido por estar en contacto con el exterior el esfuerzo axil es:

$$N_{sd} = 25.584KN$$

El pilar aumentará su esfuerzo axil a la altura del altillo, por tanto el nuevo esfuerzo axil para el tramo de altillo a empotramiento al suelo para el caso más desfavorable de tener un almacén en el altillo $y_1 = y_{fi} = 0.9$ será:

$$N_{fi,Ed} = 2N_{sd} + q_{d,fi} \cdot \frac{L'}{2} = 51.168 + 41.361 \cdot \frac{9.805}{2} = 253.94KN$$

para el caso de incendio en un nave TIPO intermedia, no para las naves de los extremos. Sabiendo que la carga uniformemente repartida en altillo es:

$$q_{d,fi} = g_{G,fi} \cdot G + g_{Q,fi} \cdot Q = 1.0 \cdot G + 0.9 \cdot Q = 1.0 \cdot 16.71 + 0.9 \cdot 27.39 = 41.36 \frac{KN}{m}$$

<u>- Pandeo del pilar (eje mínimo):</u>

Pilar articulado en su cabeza y empotrado por su base, por tanto la longitud de pandeo del pilar será: L_p=0.7·L=0.7·9.257=6.4799m

Para el tramo de pilar que va del altillo al empotramiento al suelo se tiene una longitud de pandeo: L_p=0.7·L=0.7·4.987=3.49m

5.3.2 Comprobación de la resistencia del pilar en condiciones normales (q =20ºC)

$$N_{b,Rd} = c_Z \cdot K_{y,q} \cdot A \cdot {f_Y}/{g_{M1}} = 0.9139 \cdot 1 \cdot 9198 \cdot {275}/{1} = 2311664.355N \cong 2311.664KN$$

$K_{y,q} = 1$ para q = 20ºC

$g_{M1} = 1$

<u>- Esbeltez reducida (pandeo):</u>

$$l_Y = \frac{H}{i_Y} = \frac{349}{9.43} = 37.01$$

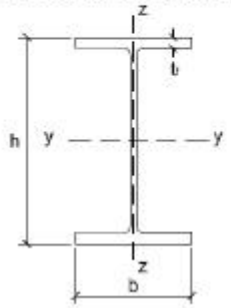
$$l_1 = 93.9 \cdot e = 93.9 \cdot 0.92 = 86.4$$

$$\overline{l}_Y = \frac{l_Y}{l_1} = \frac{37.01}{86.4} = 0.43 \rightarrow c_Y = 0.9139$$

Según CTE Parte 2 DB SE-A [7] :

Tabla 6.2 Curva de pandeo en función de la sección transversal

Tipo de sección		Tipo de acero	S235 a S355		S450	
		Eje de pandeo (1)	y	z	y	z
Perfiles laminados en I	h/b > 1,2	t ≤ 40 mm	a	b	a_o	a_o
	40 mm < t ≤ 100 mm		b	c	a	a
	h/b ≤ 1,2	t ≤ 100 mm	b	c	a	a
	t > 100 mm		d	d	c	c



Por tanto para el pilar HEB220 se tiene una curva de pandeo b (a q =20ºC)

En situación de fuego la curva de pandeo del pilar HEB220 es la curva c

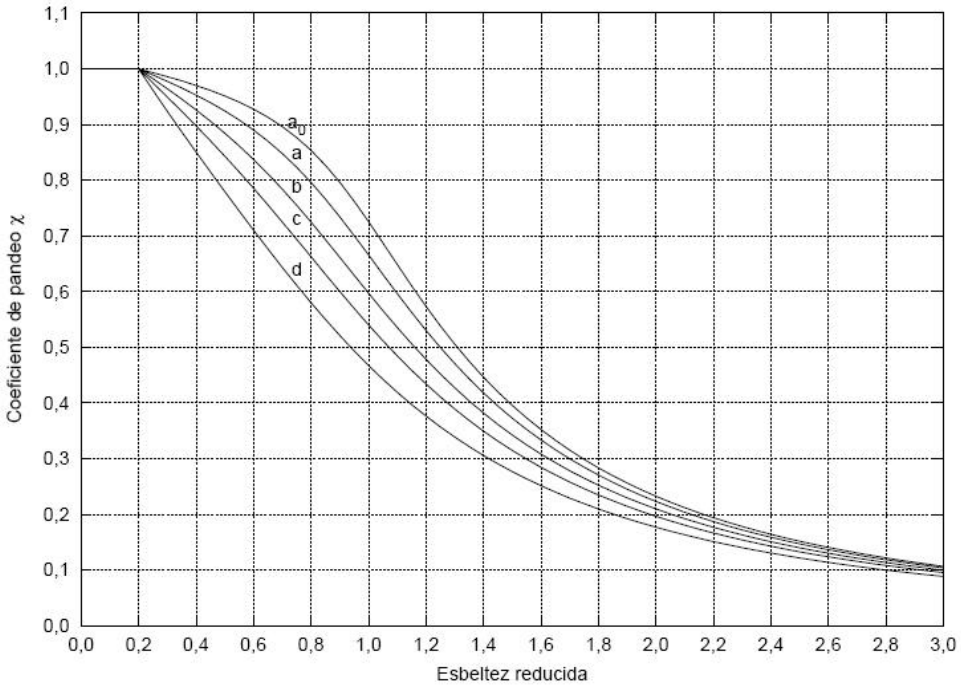


Figura 6.3 Curvas de pandeo

Tabla 6.3 Valores del coeficiente de pandeo (χ)

Esbeltez reducida	Curva de pandeo a_0	a	b	c	d
Coeficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76
≤ 0,20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,99	0,98	0,96	0,95	0,92
0,40	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85
0,50	0,95	0,92	0,88	0,84	0,78
0,60	0,93	0,89	0,84	0,79	0,71
0,70	0,90	0,85	0,78	0,72	0,64
0,80	0,85	0,80	0,72	0,66	0,58
0,90	0,80	0,73	0,66	0,60	0,52
1,00	0,73	0,67	0,60	0,54	0,47
1,10	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
1,20	0,57	0,53	0,48	0,43	0,38
1,30	0,51	0,47	0,43	0,39	0,34
1,40	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31
1,50	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,60	0,35	0,32	0,31	0,28	0,25
1,80	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
2,00 (1)	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 (1)	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 (1)	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 (2)	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 (2)	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

(1) esbeltez intolerable en los elementos principales
(2) esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostramiento

En condiciones normales (q =20ºC) y según CTE Parte 2 DB SE-A [7]:

El coeficiente c_Y de reducción por pandeo, para valores de esbeltez reducida $\overline{l}_Y \geq 0.2$, se obtiene de:

$$c_Y = \frac{1}{f + \sqrt{f^2 - \left(\overline{l}_Y\right)^2}} = \frac{1}{0.6316 + \sqrt{0.6316^2 - (0.43)^2}} = 0.9139 \leq 1$$

donde:

$$f = 0.5 \cdot \left[1 + a \cdot \left(\overline{l}_Y - 0.2\right) + \left(\overline{l}_Y\right)^2\right] = 0.5 \cdot \left[1 + \cdot 0.34 \cdot (0.43 - 0.2) + (0.43)^2\right] = 0.6316$$

a = el coeficiente de imperfección elástica, que adopta los valores de la tabla 6.3 en función de la curva de pandeo. Ésta representa la sensibilidad al fenómeno dependiendo del tipo de sección, plano de pandeo y tipo de acero.

Por tanto:

En condiciones normales para el pilar se tiene una curva de pandeo b ? $a = 0.34$

Para comprobar la resistencia del pilar en condiciones normales se tiene que cumplir:

$$N_{b,Rd} = 2311.664 KN > N_{fi,Ed} = 253.94 KN$$

La resistencia de cálculo a pandeo del pilar es superior al axil de cálculo en situación de fuego.

5.3.3 Comprobación de la protección al fuego

-Tiempo exigible de protección:

Según el RSIEI [2]:

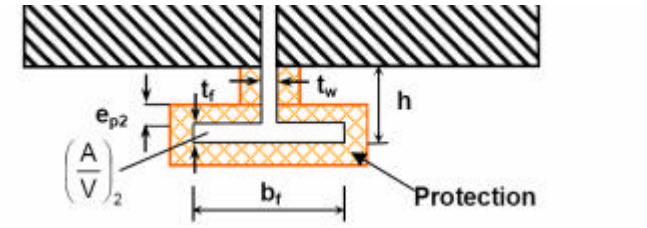
Estabilidad al fuego de elementos estructurales portantes

Nivel de riesgo intrínseco	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante	Planta sótano	Planta sobre rasante
BAJO	R 120 *(EF – 120)*	R 90 *(EF – 90)*	R 90 *(EF – 90)*	R 60 *(EF – 60)*	R 60 *(EF – 60)*	R 30 *(EF – 30)*
MEDIO	NO ADMITIDO	R 120 *(EF – 120)*	R 120 *(EF – 120)*	R 90 *(EF – 90)*	R 90 *(EF – 90)*	R 60 *(EF – 60)*
ALTO	NO ADMITIDO	NO ADMITIDO	R 180 *(EF -180)*	R 120 *(EF -120)*	R 120 *(EF -120)*	R 90 *(EF – 90)*

Por tanto para un establecimiento industrial tipo B y planta sobre rasante se requiere como mínimo una R-60 (60 minutos) para un nivel de riesgo intrínseco bajo.

- Factor de sección del pilar HEB220:

Detalle de la parte de sección del pilar encajado en placas de hormigón y expuesto a fuego con una protección de mortero Tecwool F



Donde :

b_f=b

h=14+220=234mm que es la distancia de la cara del acero expuesta al fuego a la placa de hormigón

Para el pilar HEB220: b=220mm, t_w=10mm, t_f=16mm.

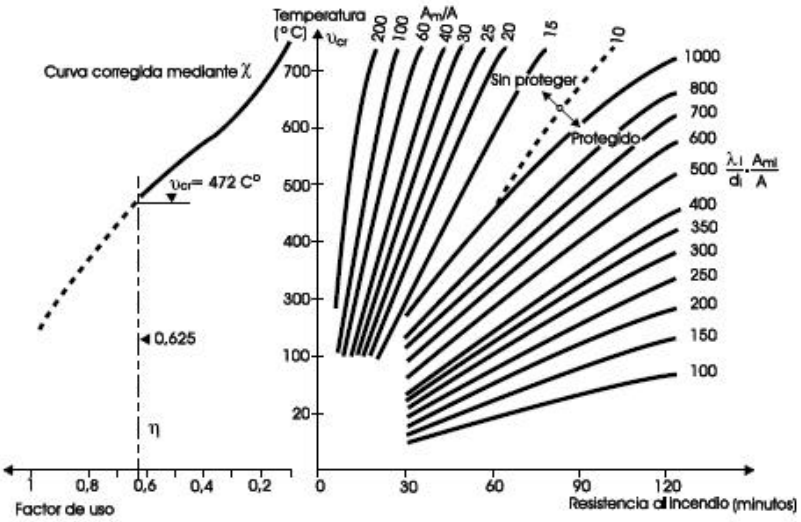
Factor de sección:

$$A_p / V = A_m / A = \frac{b + (b - t_w) + 2h}{t_f \cdot b + (h - t_f) \cdot t_w} = 157.54 m^{-1}$$

-Temperatura alcanzada a los 60min. en el acero:

- Pilar protegido con mortero Tecwool F de d_p = 30mm de espesor.

Protección con espesor de d_i=30mm y una conductividad térmica de l_i =0.044W/mºC



$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{l_i}{d_i}\cdot\dfrac{A_{mi}}{A}=\dfrac{0.044}{0.030}\cdot 157.54=231.06 \\ R-120 \quad (120\ \text{min}\ utos) \end{array}\right\} \rightarrow q_{\max}=338.24ºC$$

Donde $q_{\max}$ es la temperatura alcanzada por el elemento de acero al cabo de un instante t, en este caso de 120 min., $q_{\max}$ no es la temperatura crítica.

Se puede determinar de manera aproximada la temperatura alcanzada por el elemento de acero mediante la fórmula de ECCS (European Recommendations for Fire Safety of Steel Structures) publicada por ITEA (Instituto Técnico de la Estructura en Acero) [11].

$$t=40\cdot(q_{\max}-140)\cdot\left[\frac{d_i}{l_i}\cdot\frac{A}{A_{mi}}\right]^{0.77}$$

Según el programa ELEFIR EN V1.0 se observa:

$A_p/V={}^{A_m}\!/_{A}=157.54m^{-1}$, $d_p=30mm$, $q_{a,cr}$=1000ºC. $\rightarrow$ El pilar HEB220 tiene una R-723 (723 minutos).

En el gráfico temperatura-tiempo obtenido con el programa ELEFIR EN V1.0 se observa que el acero al cabo de 120 min. si que llega a una temperatura de $q_{\max}$=338.24ºC. Para el pilar HEB220 con protección de mortero Tecwool F con un espesor $d_p=30mm$ se tiene:

R-120 $\rightarrow$ q_a=338.24ºC

R-724 $\rightarrow q_a$=1000ºC

El RSIEI exige que dicho pilar tenga una R-120 para que la nave TIPO esté en situación de nivel de riesgo intrínseco alto, como establecimiento industrial tipo B y en planta sobre rasante.

- Pilar protegido con mortero Tecwool F de d_p = 10mm de espesor.

Protección con espesor de d_i=30mm y una conductividad térmica de l_i =0.044W/mºC

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{l_i}{d_i}\cdot\dfrac{A_{mi}}{A}=\dfrac{0.044}{0.010}\cdot 157.54=693.18 \\ R-120 \quad (120\ \min\ utos) \end{array}\right\} \rightarrow q_{\max}=601.93ºC$$

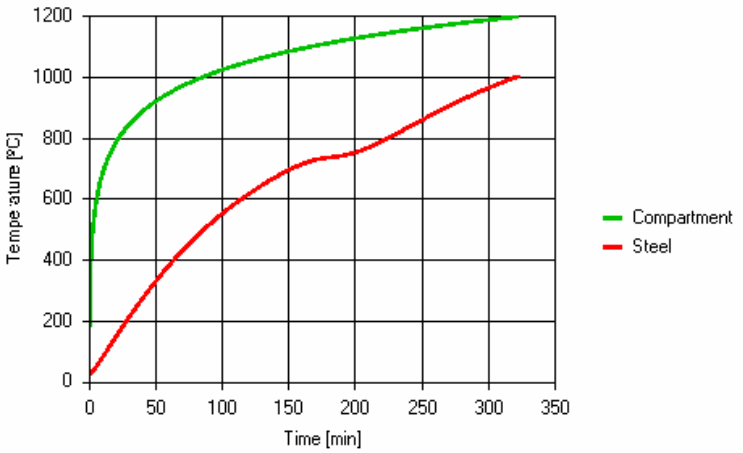
Donde $q_{\max}$ es la temperatura del elemento de acero alcanzada en un instante t, no es la temperatura crítica.

Se puede determinar de manera aproximada la temperatura alcanzada por el elemento de acero mediante la fórmula de ECCS (European Recommendations for Fire Safety of Steel Structures) publicada por ITEA (Instituto Técnico de la Estructura en Acero) [11].

$$t=40\cdot(q_{\max}-140)\cdot\left[\frac{d_i}{l_i}\cdot\frac{A}{A_{mi}}\right]^{0.77}$$

Según el programa ELEFIR EN V1.0 se observa:

$A_p/V=A_m/A=157.54m^{-1}$, $d_p=10mm, q_{a,cr}$ =1000ºC. $\rightarrow$ El pilar tiene una R-322



En el gráfico temperatura-tiempo obtenido con el programa ELEFIR EN V1.0 se observa que el acero al cabo de 120 min. si que llega a una temperatura de $q_{\max}$ =601.93ºC. Para el pilar HEB220 con protección de mortero Tecwool F con un espesor $d_p=10mm$ se tiene:

R-120 $\rightarrow$ q_a =601.93ºC

R-322 $\rightarrow q_a$ =1000ºC

El RSIEI exige que dicho pilar tenga una R-120 para que la nave TIPO esté en situación de nivel de riesgo intrínseco alto, como establecimiento industrial tipo B y en planta sobre rasante.

5.3.4 Comprobación de la resistencia del pilar protegido a la temperatura alcanzada

- Pilar protegido con mortero Tecwool F de d_p = 30mm de espesor.

<u>- Seguridad material:</u> $g_{M1} = g_{M,fi} = 1$

<u>- Longitud de pandeo (eje mínimo):</u>

$l_{fi} \cong L = 3.49m$ (igual a la de temperatura 20ºC)

$\overline{l}_Y = 0.43$ (a 20ºC y a 238.97ºC)

Esbeltez adimensional $\overline{l}_{q_{\max}}$ = $\overline{l}_q$ para la temperatura $q_{\max}$ =338.24ºC.

$$\overline{l}_{q_{\max}} = \overline{l}_Z \cdot \left[\frac{K_{y,q_{\max}}}{K_{E,q_{\max}}}\right]^{0.5}$$

Por interpolación lineal y a una $q_{\max}$ =338.24ºC se obtienen los siguientes valores:

$$K_{y,q_{\max}} = 1$$
$$K_{E,q_{\max}} = 0.762$$

Valores que se encuentran a partir de la tabla 3.1 de la EN 1993-1-2:2005.

Por tanto:

$$\overline{l}_q = \overline{l}_Y \cdot \left[\frac{K_{y,q}}{K_{E,q}}\right]^{0.5} = 0.43 \cdot \left[\frac{1}{0.762}\right]^{0.5} = 0.493$$

$K_{y,q}$ = coeficiente de reducción para la tensión de fluencia del acero a la temperatura del acero q_a alcanzada en el instante t.

$K_{E,q}$ = coeficiente de reducción para la pendiente de la región elástica lineal a la temperatura del acero alcanzada q_a en el instante t.

Tabla 3.1: Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas

Temperatura del acero θ_a	Coeficientes de reducción a temperatura θ_a respecto al valor de f_y o E_a a 20°C		
	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para la resistencia eficaz a la fluencia $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite de proporcionalidad $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a E_a) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,030	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

NOTA: Para valores intermedios de temperatura del acero, puede emplearse la interpolación lineal.

[1]

<u>- Resistencia de cálculo del pilar a pandeo a q_{max} =338.24ºC :</u>

La EN 1993-1-2:2005 (E) [1] dice que el valor de cálculo de la resistencia al pandeo $N_{b,\,fi,t,Rd}$ en el instante t de un elemento de compresión con una sección transversal de Clase 1, con una temperatura uniforme q_a, debería determinarse con:

$$N_{b,\,fi,t,Rd} = c_{fi} \cdot A \cdot K_{y,q} \cdot \frac{f_y}{g_{M,\,fi}} = 0.735 \cdot 9198 \cdot 1 \cdot \frac{275}{1} = 1859145.75N = 1859.146KN$$

$c_{fi} =$ coeficiente de reducción del pandeo a flexión en situación de fuego de cálculo.

$$c_{fi} = \frac{1}{j_q + \sqrt{j_q^{\,2} - \overline{l}_q^{\,2}}} = \frac{1}{0.7694 + \sqrt{0.7694^2 - 0.493^2}} = 0.735$$

$$j_q = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + a \cdot \overline{l}_q + \overline{l}_q^{\,2}\right] = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + 0.6 \cdot 0.493 + 0.493^2\right] = 0.7694$$

$$a = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.6$$

$$\overline{l}_q = \overline{l}_Y \cdot \left[\frac{K_{y,q}}{K_{E,q}}\right]^{0.5} = 0.43 \cdot \left[\frac{1}{0.762}\right]^{0.5} = 0.493$$

Se verifica pues que la protección de mortero Tecwool F [8] con un espesor de $d_p = 30\text{mm}$ más que suficiente para que el pilar aguante una situación de fuego accidental ya que:

$$N_{b,\,fi,t,Rd} = 1859.146KN > N_{fi,Ed} = 253.94KN$$

para el caso de incendio de almacén sobre el altillo (caso más desfavorable):

$$N_{fi,Ed} = 2N_{sd} + q_{d,fi} \cdot \frac{L'}{2} = 51.168 + 41.361 \cdot \frac{9.805}{2} = 253.94KN$$

Conclusiones

El objetivo del concepto de seguridad en caso de incendios, basado en un fuego natural consiste en definir un enfoque más realista del análisis de la estabilidad estructural en caso de incendio mediante modelos de cálculo avanzado, así como en optimizar las medidas de seguridad.

El proyectista de estructuras finalmente dispone de diferentes estrategias para responder a las exigencias de seguridad frente al incendio:

- Puede contentarse con una justificación de elementos simples para la utilización de los métodos de cálculo simplificados o de valores tabulados.
- Si los elementos no están incluidos en estos métodos, habrá que recurrir a los modelos avanzados de cálculo.
- Puede también realizarse un verdadero estudio de ingeniería de incendios basado en fuego real recurriendo a modelos de cálculo avanzados.

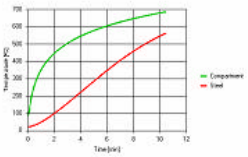
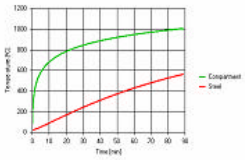
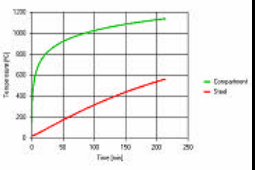
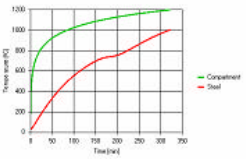
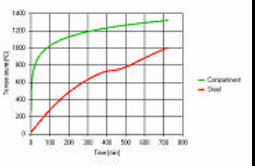
Los modelos de cálculo numérico avanzados permiten ajustar mejor el comportamiento real de las estructuras favoreciendo un modo de colapso hacia el foco del incendio, y para eliminar el riesgo de colapso en cadena.

La clasificación ISO no permite obtener el tiempo de resistencia real ni el modo o la dirección en la cual se producirá el colapso de la estructura porque ignora los ensamblajes de los elementos individuales entre sí.

Los modelos de cálculo avanzado son instrumento de análisis aplicado sobre todo tipo de estructura y están basados en general en el método de elementos finitos. En la ingeniería moderna de la seguridad ante incendios, es el medio de cálculo cada vez más utilizado gracias a las numerosas ventajas que ofrece.

El establecimiento industrial estudio de este proyecto es una nave TIPO, de una sola planta con un altillo destinado a almacén o a zona administrativa, con cubierta ligera y con sistemas de evacuación de humos.

Conclusiones según modelos de cálculo simplificados:

Perfil metálico	Sin protección	Con protección mortero Tecwool F de 10mm de espesor.	Con protección mortero Tecwool F de 30mm de espesor.
VIGA ARMADA $A_p/V = 190.47\,m^{-1}, \theta_{a,cr} = 560°C$			
PILAR HEB220 $A_p/V = 157.54\,m^{-1}, hipótesis\ \theta_{a,cr} = 1000°C$	Eliminada esta opción por razones de diseño, se evitan las deformaciones asimétricas del pilar.		

Conclusiones del análisis dinámico de modelos de cálculo avanzados:

Tres pórticos de tres naves TIPO. Con perfil Z de cubierta articulado	Con fuego NATURAL en el pórtico intermedio.	Con fuego NATURAL en el pórtico de esquina.
Fuego NATURAL del caso más crítico Nivel 5 de riesgo intrínseco: 70m^2 de la zona de fuego 1900KW/m^2 velocidad de liberación de calor 3400MJ/m^2 densidad de carga de fuego	Colapso al cabo de 19.99 min Según RSIEI podría considerarse una R-15	Colapso a los 16.50 min Según RSIEI podría considerarse una R-15
Fuego NATURAL del caso "realista" Nivel 3 de riesgo intrínseco: 70m^2 de la zona de fuego 1000KW/m^2 velocidad de liberación de calor 990MJ/m^2 densidad de carga de fuego	Análisis sin colapso de los tres pórticos de las tres naves TIPO al cabo de 3h Según RSIEI podría considerarse una R-180	Análisis sin colapso de los tres pórticos de las tres naves TIPO al cabo de 3h Según RSIEI podría considerarse una R-180

Tres pórticos de tres naves TIPO. Con perfil Z de cubierta articulado	Con fuego ISO en el pórtico intermedio.	Con fuego ISO en el pórtico de esquina.
Con vigas y pilares protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor Con viga armada articulada	Colapso al cabo de 141.30 min=2.35h Según el RSIEI podría considerarse una R-120	Colapso a los 128.73 min=2.14h Según el RSIEI podría considerarse una R-120

Agradecimientos

A todas las personas que me han ayudado a realizar este proyecto y en particular a: F. Marimon, X. Lacroizette, F. Balletbo, A. Dufour, J.M. Franssen, F.González y S. Rovira. Gracias.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] Norma europea EN 1993-1-2:2005. *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Estructuras expuestas al fuego.* Abril 2005.

[2] COL.LEGI OFICIAL D'ENGINYERS INDUSTRIALS DE CATALUNYA, CONSELL DE COL.LEGIS D'ENGINYERS TÈCNICS INDUSTRIALS DE CATALUNYA; ECA, SAU; ICICT, SA. *Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.* Marzo 2005.

[3] Noticia: Prado TM somete sus estructuras a pruebas de resistencia al fuego. [http://www.interempresas.net/Noticia.asp?ID=12555,30 de Juny de 2006]*

[4] PRADO TRANSFORMADOS METÁLICOS S.A. [http://www.pradotm.com/,30 de Juny de 2006]*

[5] J.M. FRANSSEN, V.K.R. KODUR, J.MASON. *Elements of theory for SAFIR2002 a computer program for analysis or structures submitted to the fire.* Agosto 2002.

[6] J.M. FRANSSEN (Univ. of Liege, Belgium) , V.K.R. KODUR (National Research Council of Canada, Institute For Research In Construction, Ottawa, Canada), J.MASON (.Sinclair Knight Merz, Wellington, N. Z.). *User's manual for SAFIR2004 a computer program for analysis of structures subjected to fire.* Marzo 2005.

[7] Código Técnico de la Edificación Parte 2 *Documento Básico* DB SE-A *Seguridad Estructural Acero .* Marzo 2006.

[8] *Mortero Tecwool F. Protección contra el fuego y absorción acústica* [http://www.grupotecresa.com, 4 de Juliol del 2006]*

[9] *Estabilit Europa la gama más amplia de laminados plásticos*. [http://www.stabiliteuropa.com/espanol/home.html, 4 de Juliol de 2006]*

[10] INSTIT KNAUF INSULATION. *Naves industriales, sistemas prefabricados para la protección contra el fuego y aislamiento térmico.* [http://www.knaufinsulation.net/industrial/pdfRepos/KI_Manuale.pdf#search=%22Panelroc%20RF%22, 31 d'Agost de 2006]*

[11] INSTITUTO TÉCNICO DE LA ESTRUCTURA EN ACERO (ITEA). *Tomo 6 Protección: Fuego.*

Bibliografía complementaria

[12] COPERFIL GROUP. *Edificios y parques.*
[http://www.coperfil.com/esp/index2.html, 6 de Juliol de 2006]*

[13] PAULO VILA REAL, JEAN-MARC FRANSSEN, NUNO LOPES. *SIF'06 proceedings of the 4th international workshop. Structures in fire volume 2.* 10-12 de Mayo 2006, Aveiro, Portugal. Uso de la Ingeniería de Seguridad ante un incendio en un establecimiento industrial.

[14] ITISA. *Ignifugados.* [http://www.itisa.net/ignifugatses.html, 5 de setembre del 2006]*

[15] CHRISTOPHE RENAUD. *Guide de vérification des entrepôts en structure métallique en situation d'incendie. Arrêté du 5 aôut 2002.*26 de Octubre del 2005. Guia de verificación de pórticos de estructura metálica en situación de incendio.

[16] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. *Tema 9 Resistència i protecció contra el foc, exemples de càlcul. Càlcul i disseny d'estructures metàl.liques segons la normativa eurocodi 3 i EAE.* Apunts Programa de Postgrau Disseny i Anàlisi Estructural Avançat Curs 2005-06.

Anexos

Anexo A. Modelos de cálculo avanzado

A.1 Achivo.IN del pilar HEB220 sometido a fuego ISO en una de sus alas

```
Profile: HE 220 B       Type: HE
Fire curve: FISO - Exposed Faces:1 1 1 0
Protected with: (None) 0 mm  0 mm  0 mm;

   NPTTOT      268
    NNODE  198
     NDIM    2
 NDIMMATER    1
  NDDLMAX    1
     FROM    1   TO  198 STEP    1 NDDL    1
  END_NDDL
  TEMPERAT
     TETA       0.9
  TINITIAL      20.0
  MAKE.TEM
 LARGEUR11     40000
 LARGEUR12       100
   NORENUM
HEB220.tem
     NMAT    1
  ELEMENTS
    SOLID  134
      NG    2
    NVOID    0
  END_ELEM
    NODES
     NODE    1    0.1100   -0.1100
     NODE    2    0.1100   -0.1015
     NODE    3    0.1100   -0.0930
     NODE    4    0.1100   -0.0845
     NODE    5    0.1100   -0.0760
     NODE    6    0.1100   -0.0675
     NODE    7    0.1100   -0.0590
     NODE    8    0.1100   -0.0505
     NODE    9    0.1100   -0.0420
     NODE   10    0.1100   -0.0335
     NODE   11    0.1100   -0.0250
     NODE   12    0.1100   -0.0165
     NODE   13    0.1100   -0.0048
     NODE   14    0.1100    0.0000
     NODE   15    0.1100    0.0048
     NODE   16    0.1100    0.0165
     NODE   17    0.1100    0.0250
     NODE   18    0.1100    0.0335
     NODE   19    0.1100    0.0420
     NODE   20    0.1100    0.0505
     NODE   21    0.1100    0.0590
     NODE   22    0.1100    0.0675
     NODE   23    0.1100    0.0760
     NODE   24    0.1100    0.0845
     NODE   25    0.1100    0.0930
     NODE   26    0.1100    0.1015
     NODE   27    0.1100    0.1100
     NODE   28    0.1020   -0.1100
     NODE   29    0.1020   -0.1015
     NODE   30    0.1020   -0.0930
     NODE   31    0.1020   -0.0845
     NODE   32    0.1020   -0.0760
     NODE   33    0.1020   -0.0675
     NODE   34    0.1020   -0.0590
     NODE   35    0.1020   -0.0505
     NODE   36    0.1020   -0.0420
     NODE   37    0.1020   -0.0335
     NODE   38    0.1020   -0.0250
     NODE   39    0.1020   -0.0165
     NODE   40    0.1020   -0.0048
     NODE   41    0.1020    0.0000
     NODE   42    0.1020    0.0048
     NODE   43    0.1020    0.0165
     NODE   44    0.1020    0.0250
     NODE   45    0.1020    0.0335
     NODE   46    0.1020    0.0420
     NODE   47    0.1020    0.0505
     NODE   48    0.1020    0.0590
     NODE   49    0.1020    0.0675
     NODE   50    0.1020    0.0760
     NODE   51    0.1020    0.0845
     NODE   52    0.1020    0.0930
     NODE   53    0.1020    0.1015
     NODE   54    0.1020    0.1100
     NODE   55    0.0940   -0.1100
     NODE   56    0.0940   -0.1015
     NODE   57    0.0940   -0.0930
     NODE   58    0.0940   -0.0845
     NODE   59    0.0940   -0.0760
     NODE   60    0.0940   -0.0675
     NODE   61    0.0940   -0.0590
     NODE   62    0.0940   -0.0505
     NODE   63    0.0940   -0.0420
     NODE   64    0.0940   -0.0335
     NODE   65    0.0940   -0.0250
     NODE   66    0.0940   -0.0165
     NODE   67    0.0940   -0.0048
     NODE   68    0.0940    0.0000
     NODE   69    0.0940    0.0048
     NODE   70    0.0940    0.0165
     NODE   71    0.0940    0.0250
     NODE   72    0.0940    0.0335
     NODE   73    0.0940    0.0420
     NODE   74    0.0940    0.0505
     NODE   75    0.0940    0.0590
     NODE   76    0.0940    0.0675
     NODE   77    0.0940    0.0760
     NODE   78    0.0940    0.0845
     NODE   79    0.0940    0.0930
     NODE   80    0.0940    0.1015
     NODE   81    0.0940    0.1100
     NODE   82    0.0822   -0.0048
```

```
NODE   83   0.0822   0.0000
NODE   84   0.0822   0.0048
NODE   85   0.0673  -0.0048
NODE   86   0.0673   0.0000
NODE   87   0.0673   0.0048
NODE   88   0.0523  -0.0048
NODE   89   0.0523   0.0000
NODE   90   0.0523   0.0048
NODE   91   0.0374  -0.0048
NODE   92   0.0374   0.0000
NODE   93   0.0374   0.0048
NODE   94   0.0224  -0.0048
NODE   95   0.0224   0.0000
NODE   96   0.0224   0.0048
NODE   97   0.0075  -0.0048
NODE   98   0.0075   0.0000
NODE   99   0.0075   0.0048
NODE  100  -0.0075  -0.0048
NODE  101  -0.0075   0.0000
NODE  102  -0.0075   0.0048
NODE  103  -0.0224  -0.0048
NODE  104  -0.0224   0.0000
NODE  105  -0.0224   0.0048
NODE  106  -0.0374  -0.0048
NODE  107  -0.0374   0.0000
NODE  108  -0.0374   0.0048
NODE  109  -0.0523  -0.0048
NODE  110  -0.0523   0.0000
NODE  111  -0.0523   0.0048
NODE  112  -0.0673  -0.0048
NODE  113  -0.0673   0.0000
NODE  114  -0.0673   0.0048
NODE  115  -0.0822  -0.0048
NODE  116  -0.0822   0.0000
NODE  117  -0.0822   0.0048
NODE  118  -0.0940  -0.1100
NODE  119  -0.0940  -0.1015
NODE  120  -0.0940  -0.0930
NODE  121  -0.0940  -0.0845
NODE  122  -0.0940  -0.0760
NODE  123  -0.0940  -0.0675
NODE  124  -0.0940  -0.0590
NODE  125  -0.0940  -0.0505
NODE  126  -0.0940  -0.0420
NODE  127  -0.0940  -0.0335
NODE  128  -0.0940  -0.0250
NODE  129  -0.0940  -0.0165
NODE  130  -0.0940  -0.0048
NODE  131  -0.0940   0.0000
NODE  132  -0.0940   0.0048
NODE  133  -0.0940   0.0165
NODE  134  -0.0940   0.0250
NODE  135  -0.0940   0.0335
NODE  136  -0.0940   0.0420
NODE  137  -0.0940   0.0505
NODE  138  -0.0940   0.0590
NODE  139  -0.0940   0.0675
NODE  140  -0.0940   0.0760
NODE  141  -0.0940   0.0845
NODE  142  -0.0940   0.0930
NODE  143  -0.0940   0.1015
NODE  144  -0.0940   0.1100
NODE  145  -0.1020  -0.1100
NODE  146  -0.1020  -0.1015
NODE  147  -0.1020  -0.0930
NODE  148  -0.1020  -0.0845
NODE  149  -0.1020  -0.0760
NODE  150  -0.1020  -0.0675
NODE  151  -0.1020  -0.0590
NODE  152  -0.1020  -0.0505
NODE  153  -0.1020  -0.0420
NODE  154  -0.1020  -0.0335
NODE  155  -0.1020  -0.0250
NODE  156  -0.1020  -0.0165
NODE  157  -0.1020  -0.0048
NODE  158  -0.1020   0.0000
NODE  159  -0.1020   0.0048
NODE  160  -0.1020   0.0165
NODE  161  -0.1020   0.0250
NODE  162  -0.1020   0.0335
NODE  163  -0.1020   0.0420
NODE  164  -0.1020   0.0505
NODE  165  -0.1020   0.0590
NODE  166  -0.1020   0.0675
NODE  167  -0.1020   0.0760
NODE  168  -0.1020   0.0845
NODE  169  -0.1020   0.0930
NODE  170  -0.1020   0.1015
NODE  171  -0.1020   0.1100
NODE  172  -0.1100  -0.1100
NODE  173  -0.1100  -0.1015
NODE  174  -0.1100  -0.0930
NODE  175  -0.1100  -0.0845
NODE  176  -0.1100  -0.0760
NODE  177  -0.1100  -0.0675
NODE  178  -0.1100  -0.0590
NODE  179  -0.1100  -0.0505
NODE  180  -0.1100  -0.0420
NODE  181  -0.1100  -0.0335
NODE  182  -0.1100  -0.0250
NODE  183  -0.1100  -0.0165
NODE  184  -0.1100  -0.0048
NODE  185  -0.1100   0.0000
NODE  186  -0.1100   0.0048
NODE  187  -0.1100   0.0165
NODE  188  -0.1100   0.0250
NODE  189  -0.1100   0.0335
NODE  190  -0.1100   0.0420
NODE  191  -0.1100   0.0505
NODE  192  -0.1100   0.0590
NODE  193  -0.1100   0.0675
NODE  194  -0.1100   0.0760
NODE  195  -0.1100   0.0845
NODE  196  -0.1100   0.0930
NODE  197  -0.1100   0.1015
NODE  198  -0.1100   0.1100
NODELINE        0     0
YC_ZC           0     0
FIXATIONS
END_FIX
NODOFSOLID
ELEM   1   1  28  29   2   1  0.
ELEM   2   2  29  30   3   1  0.
ELEM   3   3  30  31   4   1  0.
ELEM   4   4  31  32   5   1  0.
ELEM   5   5  32  33   6   1  0.
ELEM   6   6  33  34   7   1  0.
ELEM   7   7  34  35   8   1  0.
ELEM   8   8  35  36   9   1  0.
ELEM   9   9  36  37  10   1  0.
ELEM  10  10  37  38  11   1  0.
```

```
ELEM  11  11  38  39  12   1  0.
ELEM  12  12  39  40  13   1  0.
ELEM  13  13  40  41  14   1  0.
ELEM  14  14  41  42  15   1  0.
ELEM  15  15  42  43  16   1  0.
ELEM  16  16  43  44  17   1  0.
ELEM  17  17  44  45  18   1  0.
ELEM  18  18  45  46  19   1  0.
ELEM  19  19  46  47  20   1  0.
ELEM  20  20  47  48  21   1  0.
ELEM  21  21  48  49  22   1  0.
ELEM  22  22  49  50  23   1  0.
ELEM  23  23  50  51  24   1  0.
ELEM  24  24  51  52  25   1  0.
ELEM  25  25  52  53  26   1  0.
ELEM  26  26  53  54  27   1  0.
ELEM  27  28  55  56  29   1  0.
ELEM  28  29  56  57  30   1  0.
ELEM  29  30  57  58  31   1  0.
ELEM  30  31  58  59  32   1  0.
ELEM  31  32  59  60  33   1  0.
ELEM  32  33  60  61  34   1  0.
ELEM  33  34  61  62  35   1  0.
ELEM  34  35  62  63  36   1  0.
ELEM  35  36  63  64  37   1  0.
ELEM  36  37  64  65  38   1  0.
ELEM  37  38  65  66  39   1  0.
ELEM  38  39  66  67  40   1  0.
ELEM  39  40  67  68  41   1  0.
ELEM  40  41  68  69  42   1  0.
ELEM  41  42  69  70  43   1  0.
ELEM  42  43  70  71  44   1  0.
ELEM  43  44  71  72  45   1  0.
ELEM  44  45  72  73  46   1  0.
ELEM  45  46  73  74  47   1  0.
ELEM  46  47  74  75  48   1  0.
ELEM  47  48  75  76  49   1  0.
ELEM  48  49  76  77  50   1  0.
ELEM  49  50  77  78  51   1  0.
ELEM  50  51  78  79  52   1  0.
ELEM  51  52  79  80  53   1  0.
ELEM  52  53  80  81  54   1  0.
ELEM  53  66  82  67   0   1  0.
ELEM  54  67  82  83  68   1  0.
ELEM  55  68  83  84  69   1  0.
ELEM  56  69  84  70   0   1  0.
ELEM  57  82  85  86  83   1  0.
ELEM  58  83  86  87  84   1  0.
ELEM  59  85  88  89  86   1  0.
ELEM  60  86  89  90  87   1  0.
ELEM  61  88  91  92  89   1  0.
ELEM  62  89  92  93  90   1  0.
ELEM  63  91  94  95  92   1  0.
ELEM  64  92  95  96  93   1  0.
ELEM  65  94  97  98  95   1  0.
ELEM  66  95  98  99  96   1  0.
ELEM  67  97 100 101  98   1  0.
ELEM  68  98 101 102  99   1  0.
ELEM  69 100 103 104 101   1  0.
ELEM  70 101 104 105 102   1  0.
ELEM  71 103 106 107 104   1  0.
ELEM  72 104 107 108 105   1  0.
ELEM  73 106 109 110 107   1  0.
ELEM  74 107 110 111 108   1  0.
ELEM  75 109 112 113 110   1  0.
ELEM  76 110 113 114 111   1  0.
ELEM  77 112 115 116 113   1  0.
ELEM  78 113 116 117 114   1  0.
ELEM  79 115 129 130   0   1  0.
ELEM  80 115 130 131 116   1  0.
ELEM  81 116 131 132 117   1  0.
ELEM  82 117 132 133   0   1  0.
ELEM  83 118 145 146 119   1  0.
ELEM  84 119 146 147 120   1  0.
ELEM  85 120 147 148 121   1  0.
ELEM  86 121 148 149 122   1  0.
ELEM  87 122 149 150 123   1  0.
ELEM  88 123 150 151 124   1  0.
ELEM  89 124 151 152 125   1  0.
ELEM  90 125 152 153 126   1  0.
ELEM  91 126 153 154 127   1  0.
ELEM  92 127 154 155 128   1  0.
ELEM  93 128 155 156 129   1  0.
ELEM  94 129 156 157 130   1  0.
ELEM  95 130 157 158 131   1  0.
ELEM  96 131 158 159 132   1  0.
ELEM  97 132 159 160 133   1  0.
ELEM  98 133 160 161 134   1  0.
ELEM  99 134 161 162 135   1  0.
ELEM 100 135 162 163 136   1  0.
ELEM 101 136 163 164 137   1  0.
ELEM 102 137 164 165 138   1  0.
ELEM 103 138 165 166 139   1  0.
ELEM 104 139 166 167 140   1  0.
ELEM 105 140 167 168 141   1  0.
ELEM 106 141 168 169 142   1  0.
ELEM 107 142 169 170 143   1  0.
ELEM 108 143 170 171 144   1  0.
ELEM 109 145 172 173 146   1  0.
ELEM 110 146 173 174 147   1  0.
ELEM 111 147 174 175 148   1  0.
ELEM 112 148 175 176 149   1  0.
ELEM 113 149 176 177 150   1  0.
ELEM 114 150 177 178 151   1  0.
ELEM 115 151 178 179 152   1  0.
ELEM 116 152 179 180 153   1  0.
ELEM 117 153 180 181 154   1  0.
ELEM 118 154 181 182 155   1  0.
ELEM 119 155 182 183 156   1  0.
ELEM 120 156 183 184 157   1  0.
ELEM 121 157 184 185 158   1  0.
ELEM 122 158 185 186 159   1  0.
ELEM 123 159 186 187 160   1  0.
ELEM 124 160 187 188 161   1  0.
ELEM 125 161 188 189 162   1  0.
ELEM 126 162 189 190 163   1  0.
ELEM 127 163 190 191 164   1  0.
ELEM 128 164 191 192 165   1  0.
ELEM 129 165 192 193 166   1  0.
ELEM 130 166 193 194 167   1  0.
ELEM 131 167 194 195 168   1  0.
ELEM 132 168 195 196 169   1  0.
ELEM 133 169 196 197 170   1  0.
ELEM 134 170 197 198 171   1  0.
FRONTIER
 F  1    F20     NO     NO     NO
 F  1    NO      NO     NO     F20
 F  2    NO      NO     NO     F20
 F  3    NO      NO     NO     F20
 F  4    NO      NO     NO     F20
 F  5    NO      NO     NO     F20
```

```
  F   6     NO      NO      NO      F20
  F   7     NO      NO      NO      F20
  F   8     NO      NO      NO      F20
  F   9     NO      NO      NO      F20
  F   10    NO      NO      NO      F20
  F   11    NO      NO      NO      F20
  F   12    NO      NO      NO      F20
  F   13    NO      NO      NO      F20
  F   14    NO      NO      NO      F20
  F   15    NO      NO      NO      F20
  F   16    NO      NO      NO      F20
  F   17    NO      NO      NO      F20
  F   18    NO      NO      NO      F20
  F   19    NO      NO      NO      F20
  F   20    NO      NO      NO      F20
  F   21    NO      NO      NO      F20
  F   22    NO      NO      NO      F20
  F   23    NO      NO      NO      F20
  F   24    NO      NO      NO      F20
  F   25    NO      NO      NO      F20
  F   26    NO      NO      F20     F20
  F   26    NO      NO      NO      F20
  F   27    F20     NO      NO      NO
  F   83    FISO    NO      NO      NO
  F  109    FISO    NO      NO      NO
  F  109    NO      FISO    NO      NO
  F  110    NO      FISO    NO      NO
  F  111    NO      FISO    NO      NO
  F  112    NO      FISO    NO      NO
  F  113    NO      FISO    NO      NO
  F  114    NO      FISO    NO      NO
  F  115    NO      FISO    NO      NO
  F  116    NO      FISO    NO      NO
  F  117    NO      FISO    NO      NO
  F  118    NO      FISO    NO      NO
  F  119    NO      FISO    NO      NO
  F  120    NO      FISO    NO      NO
  F  121    NO      FISO    NO      NO
  F  122    NO      FISO    NO      NO
  F  123    NO      FISO    NO      NO
  F  124    NO      FISO    NO      NO
  F  125    NO      FISO    NO      NO
  F  126    NO      FISO    NO      NO
  F  127    NO      FISO    NO      NO
  F  128    NO      FISO    NO      NO
  F  129    NO      FISO    NO      NO
  F  130    NO      FISO    NO      NO
  F  131    NO      FISO    NO      NO
  F  132    NO      FISO    NO      NO
  F  133    NO      FISO    NO      NO
  F  134    NO      FISO    NO      NO
  F   52    NO      NO      F20     NO
  F  108    NO      NO      FISO    NO
  F  108    NO      NO      FISO    NO
  F  134    NO      NO      FISO    NO
END_FRONT
 SYMMETRY
  END_SYM
PRECISION    1.E-3
MATERIALS
 STEELEC3
          25.     9.     0.50
   TIME
          12.    3600.
 END_TIME
IMPRESSION
TIMEPRINT
          60.    3600.
END_TIMEPR
```

A.2 Archivo.IN de la generación de las placas de hormigón + pilar HEB220

```
Profile: HE 220 B       Type: HE
Fire curve: FISO - Exposed Faces:1 1 1 0
Protected with: (None) 0 mm  0 mm  0 mm;

   NPTTOT      868
    NNODE  718
     NDIM    2
 NDIMMATER    1
   NDDLMAX    1
     FROM    1   TO  718 STEP    1 NDDL    1
  END_NDDL
  TEMPERAT
     TETA       0.9
  TINITIAL      20.0
  MAKE.TEM
 LARGEUR11     40000
 LARGEUR12       100
   NORENUM
HEB220.tem
     NMAT    2
  ELEMENTS
    SOLID  590
      NG    2
    NVOID    0
  END_ELEM
    NODES
     NODE    1    0.1100   -0.1100
     NODE    2    0.1100   -0.1015
     NODE    3    0.1100   -0.0930
     NODE    4    0.1100   -0.0845
     NODE    5    0.1100   -0.0760
     NODE    6    0.1100   -0.0675
     NODE    7    0.1100   -0.0590
     NODE    8    0.1100   -0.0505
     NODE    9    0.1100   -0.0420
     NODE   10    0.1100   -0.0335
     NODE   11    0.1100   -0.0250
     NODE   12    0.1100   -0.0165
     NODE   13    0.1100   -0.0048
     NODE   14    0.1100    0.0000
     NODE   15    0.1100    0.0048
     NODE   16    0.1100    0.0165
     NODE   17    0.1100    0.0250
     NODE   18    0.1100    0.0335
     NODE   19    0.1100    0.0420
     NODE   20    0.1100    0.0505
     NODE   21    0.1100    0.0590
     NODE   22    0.1100    0.0675
     NODE   23    0.1100    0.0760
     NODE   24    0.1100    0.0845
     NODE   25    0.1100    0.0930
     NODE   26    0.1100    0.1015
     NODE   27    0.1100    0.1100
     NODE   28    0.1020   -0.1100
     NODE   29    0.1020   -0.1015
     NODE   30    0.1020   -0.0930
     NODE   31    0.1020   -0.0845
     NODE   32    0.1020   -0.0760
     NODE   33    0.1020   -0.0675
     NODE   34    0.1020   -0.0590
     NODE   35    0.1020   -0.0505
     NODE   36    0.1020   -0.0420
     NODE   37    0.1020   -0.0335
     NODE   38    0.1020   -0.0250
     NODE   39    0.1020   -0.0165
     NODE   40    0.1020   -0.0048
     NODE   41    0.1020    0.0000
     NODE   42    0.1020    0.0048
     NODE   43    0.1020    0.0165
     NODE   44    0.1020    0.0250
     NODE   45    0.1020    0.0335
     NODE   46    0.1020    0.0420
     NODE   47    0.1020    0.0505
     NODE   48    0.1020    0.0590
     NODE   49    0.1020    0.0675
     NODE   50    0.1020    0.0760
     NODE   51    0.1020    0.0845
     NODE   52    0.1020    0.0930
     NODE   53    0.1020    0.1015
     NODE   54    0.1020    0.1100
     NODE   55    0.0940   -0.1100
     NODE   56    0.0940   -0.1015
     NODE   57    0.0940   -0.0930
     NODE   58    0.0940   -0.0845
     NODE   59    0.0940   -0.0760
     NODE   60    0.0940   -0.0675
     NODE   61    0.0940   -0.0590
     NODE   62    0.0940   -0.0505
     NODE   63    0.0940   -0.0420
     NODE   64    0.0940   -0.0335
     NODE   65    0.0940   -0.0250
     NODE   66    0.0940   -0.0165
     NODE   67    0.0940   -0.0048
     NODE   68    0.0940    0.0000
     NODE   69    0.0940    0.0048
     NODE   70    0.0940    0.0165
     NODE   71    0.0940    0.0250
     NODE   72    0.0940    0.0335
     NODE   73    0.0940    0.0420
     NODE   74    0.0940    0.0505
     NODE   75    0.0940    0.0590
     NODE   76    0.0940    0.0675
     NODE   77    0.0940    0.0760
     NODE   78    0.0940    0.0845
     NODE   79    0.0940    0.0930
     NODE   80    0.0940    0.1015
     NODE   81    0.0940    0.1100
     NODE   82    0.0822   -0.0048
     NODE   83    0.0822    0.0000
     NODE   84    0.0822    0.0048
     NODE   85    0.0673   -0.0048
     NODE   86    0.0673    0.0000
     NODE   87    0.0673    0.0048
     NODE   88    0.0523   -0.0048
     NODE   89    0.0523    0.0000
     NODE   90    0.0523    0.0048
     NODE   91    0.0374   -0.0048
     NODE   92    0.0374    0.0000
     NODE   93    0.0374    0.0048
     NODE   94    0.0224   -0.0048
     NODE   95    0.0224    0.0000
     NODE   96    0.0224    0.0048
     NODE   97    0.0075   -0.0048
     NODE   98    0.0075    0.0000
     NODE   99    0.0075    0.0048
     NODE  100   -0.0075   -0.0048
```

NODE	101	-0.0075	0.0000
NODE	102	-0.0075	0.0048
NODE	103	-0.0224	-0.0048
NODE	104	-0.0224	0.0000
NODE	105	-0.0224	0.0048
NODE	106	-0.0374	-0.0048
NODE	107	-0.0374	0.0000
NODE	108	-0.0374	0.0048
NODE	109	-0.0523	-0.0048
NODE	110	-0.0523	0.0000
NODE	111	-0.0523	0.0048
NODE	112	-0.0673	-0.0048
NODE	113	-0.0673	0.0000
NODE	114	-0.0673	0.0048
NODE	115	-0.0822	-0.0048
NODE	116	-0.0822	0.0000
NODE	117	-0.0822	0.0048
NODE	118	-0.0940	-0.1100
NODE	119	-0.0940	-0.1015
NODE	120	-0.0940	-0.0930
NODE	121	-0.0940	-0.0845
NODE	122	-0.0940	-0.0760
NODE	123	-0.0940	-0.0675
NODE	124	-0.0940	-0.0590
NODE	125	-0.0940	-0.0505
NODE	126	-0.0940	-0.0420
NODE	127	-0.0940	-0.0335
NODE	128	-0.0940	-0.0250
NODE	129	-0.0940	-0.0165
NODE	130	-0.0940	-0.0048
NODE	131	-0.0940	0.0000
NODE	132	-0.0940	0.0048
NODE	133	-0.0940	0.0165
NODE	134	-0.0940	0.0250
NODE	135	-0.0940	0.0335
NODE	136	-0.0940	0.0420
NODE	137	-0.0940	0.0505
NODE	138	-0.0940	0.0590
NODE	139	-0.0940	0.0675
NODE	140	-0.0940	0.0760
NODE	141	-0.0940	0.0845
NODE	142	-0.0940	0.0930
NODE	143	-0.0940	0.1015
NODE	144	-0.0940	0.1100
NODE	145	-0.1020	-0.1100
NODE	146	-0.1020	-0.1015
NODE	147	-0.1020	-0.0930
NODE	148	-0.1020	-0.0845
NODE	149	-0.1020	-0.0760
NODE	150	-0.1020	-0.0675
NODE	151	-0.1020	-0.0590
NODE	152	-0.1020	-0.0505
NODE	153	-0.1020	-0.0420
NODE	154	-0.1020	-0.0335
NODE	155	-0.1020	-0.0250
NODE	156	-0.1020	-0.0165
NODE	157	-0.1020	-0.0048
NODE	158	-0.1020	0.0000
NODE	159	-0.1020	0.0048
NODE	160	-0.1020	0.0165
NODE	161	-0.1020	0.0250
NODE	162	-0.1020	0.0335
NODE	163	-0.1020	0.0420
NODE	164	-0.1020	0.0505
NODE	165	-0.1020	0.0590
NODE	166	-0.1020	0.0675
NODE	167	-0.1020	0.0760
NODE	168	-0.1020	0.0845
NODE	169	-0.1020	0.0930
NODE	170	-0.1020	0.1015
NODE	171	-0.1020	0.1100
NODE	172	-0.1100	-0.1100
NODE	173	-0.1100	-0.1015
NODE	174	-0.1100	-0.0930
NODE	175	-0.1100	-0.0845
NODE	176	-0.1100	-0.0760
NODE	177	-0.1100	-0.0675
NODE	178	-0.1100	-0.0590
NODE	179	-0.1100	-0.0505
NODE	180	-0.1100	-0.0420
NODE	181	-0.1100	-0.0335
NODE	182	-0.1100	-0.0250
NODE	183	-0.1100	-0.0165
NODE	184	-0.1100	-0.0048
NODE	185	-0.1100	0.0000
NODE	186	-0.1100	0.0048
NODE	187	-0.1100	0.0165
NODE	188	-0.1100	0.0250
NODE	189	-0.1100	0.0335
NODE	190	-0.1100	0.0420
NODE	191	-0.1100	0.0505
NODE	192	-0.1100	0.0590
NODE	193	-0.1100	0.0675
NODE	194	-0.1100	0.0760
NODE	195	-0.1100	0.0845
NODE	196	-0.1100	0.0930
NODE	197	-0.1100	0.1015
NODE	198	-0.1100	0.1100
NODE	199	0.0800	0.0048
GNODE	218	0.0800	0.552 1
NODE	219	0.0750	0.0048
GNODE	238	0.0750	0.552 1
NODE	239	0.0600	0.0048
GNODE	258	0.0600	0.552 1
NODE	259	0.0450	0.0048
GNODE	278	0.0450	0.552 1
NODE	279	0.0300	0.0048
GNODE	298	0.0300	0.552 1
NODE	299	0.0150	0.0048
GNODE	318	0.0150	0.552 1
NODE	319	0.0000	0.0048
GNODE	338	0.0000	0.552 1
NODE	339	-0.0150	0.0048
GNODE	358	-0.0150	0.552 1
NODE	359	-0.0300	0.0048
GNODE	378	-0.0300	0.552 1
NODE	379	-0.0450	0.0048
GNODE	398	-0.0450	0.552 1
NODE	399	-0.0600	0.0048
GNODE	418	-0.0600	0.552 1
NODE	419	-0.0750	0.0048
GNODE	438	-0.0750	0.552 1
NODE	439	-0.0800	0.0048
GNODE	458	-0.0800	0.552 1
NODE	459	0.0800	-0.552
GNODE	478	0.0800	-0.0048 1
NODE	479	0.0750	-0.552
GNODE	498	0.0750	-0.0048 1
NODE	499	0.0600	-0.552
GNODE	518	0.0600	-0.0048 1
NODE	519	0.0450	-0.552

```
    GNODE 538    0.0450   -0.0048      1
    NODE  539    0.0300   -0.552
    GNODE 558    0.0300   -0.0048      1
    NODE  559    0.0150   -0.552
    GNODE 578    0.0150   -0.0048      1
    NODE  579    0.0000   -0.552
    GNODE 598    0.0000   -0.0048      1
    NODE  599   -0.0150   -0.552
    GNODE 618   -0.0150   -0.0048      1
    NODE  619   -0.0300   -0.552
    GNODE 638   -0.0300   -0.0048      1
    NODE  639   -0.0450   -0.552
    GNODE 658   -0.0450   -0.0048      1
    NODE  659   -0.0600   -0.552
    GNODE 678   -0.0600   -0.0048      1
    NODE  679   -0.0750   -0.552
    GNODE 698   -0.0750   -0.0048      1
    NODE  699   -0.0800   -0.552
    GNODE 718   -0.0800   -0.0048      1
  NODELINE          0        0
   YC_ZC            0        0
 FIXATIONS
  END_FIX
NODOFSOLID
    ELEM   1   1  28  29   2   1  0.
    ELEM   2   2  29  30   3   1  0.
    ELEM   3   3  30  31   4   1  0.
    ELEM   4   4  31  32   5   1  0.
    ELEM   5   5  32  33   6   1  0.
    ELEM   6   6  33  34   7   1  0.
    ELEM   7   7  34  35   8   1  0.
    ELEM   8   8  35  36   9   1  0.
    ELEM   9   9  36  37  10   1  0.
    ELEM  10  10  37  38  11   1  0.
    ELEM  11  11  38  39  12   1  0.
    ELEM  12  12  39  40  13   1  0.
    ELEM  13  13  40  41  14   1  0.
    ELEM  14  14  41  42  15   1  0.
    ELEM  15  15  42  43  16   1  0.
    ELEM  16  16  43  44  17   1  0.
    ELEM  17  17  44  45  18   1  0.
    ELEM  18  18  45  46  19   1  0.
    ELEM  19  19  46  47  20   1  0.
    ELEM  20  20  47  48  21   1  0.
    ELEM  21  21  48  49  22   1  0.
    ELEM  22  22  49  50  23   1  0.
    ELEM  23  23  50  51  24   1  0.
    ELEM  24  24  51  52  25   1  0.
    ELEM  25  25  52  53  26   1  0.
    ELEM  26  26  53  54  27   1  0.
    ELEM  27  28  55  56  29   1  0.
    ELEM  28  29  56  57  30   1  0.
    ELEM  29  30  57  58  31   1  0.
    ELEM  30  31  58  59  32   1  0.
    ELEM  31  32  59  60  33   1  0.
    ELEM  32  33  60  61  34   1  0.
    ELEM  33  34  61  62  35   1  0.
    ELEM  34  35  62  63  36   1  0.
    ELEM  35  36  63  64  37   1  0.
    ELEM  36  37  64  65  38   1  0.
    ELEM  37  38  65  66  39   1  0.
    ELEM  38  39  66  67  40   1  0.
    ELEM  39  40  67  68  41   1  0.
    ELEM  40  41  68  69  42   1  0.
    ELEM  41  42  69  70  43   1  0.
    ELEM  42  43  70  71  44   1  0.
    ELEM  43  44  71  72  45   1  0.
    ELEM  44  45  72  73  46   1  0.
    ELEM  45  46  73  74  47   1  0.
    ELEM  46  47  74  75  48   1  0.
    ELEM  47  48  75  76  49   1  0.
    ELEM  48  49  76  77  50   1  0.
    ELEM  49  50  77  78  51   1  0.
    ELEM  50  51  78  79  52   1  0.
    ELEM  51  52  79  80  53   1  0.
    ELEM  52  53  80  81  54   1  0.
    ELEM  53  66  82  67   0   1  0.
    ELEM  54  67  82  83  68   1  0.
    ELEM  55  68  83  84  69   1  0.
    ELEM  56  69  84  70   0   1  0.
    ELEM  57  82  85  86  83   1  0.
    ELEM  58  83  86  87  84   1  0.
    ELEM  59  85  88  89  86   1  0.
    ELEM  60  86  89  90  87   1  0.
    ELEM  61  88  91  92  89   1  0.
    ELEM  62  89  92  93  90   1  0.
    ELEM  63  91  94  95  92   1  0.
    ELEM  64  92  95  96  93   1  0.
    ELEM  65  94  97  98  95   1  0.
    ELEM  66  95  98  99  96   1  0.
    ELEM  67  97 100 101  98   1  0.
    ELEM  68  98 101 102  99   1  0.
    ELEM  69 100 103 104 101   1  0.
    ELEM  70 101 104 105 102   1  0.
    ELEM  71 103 106 107 104   1  0.
    ELEM  72 104 107 108 105   1  0.
    ELEM  73 106 109 110 107   1  0.
    ELEM  74 107 110 111 108   1  0.
    ELEM  75 109 112 113 110   1  0.
    ELEM  76 110 113 114 111   1  0.
    ELEM  77 112 115 116 113   1  0.
    ELEM  78 113 116 117 114   1  0.
    ELEM  79 115 129 130   0   1  0.
    ELEM  80 115 130 131 116   1  0.
    ELEM  81 116 131 132 117   1  0.
    ELEM  82 117 132 133   0   1  0.
    ELEM  83 118 145 146 119   1  0.
    ELEM  84 119 146 147 120   1  0.
    ELEM  85 120 147 148 121   1  0.
    ELEM  86 121 148 149 122   1  0.
    ELEM  87 122 149 150 123   1  0.
    ELEM  88 123 150 151 124   1  0.
    ELEM  89 124 151 152 125   1  0.
    ELEM  90 125 152 153 126   1  0.
    ELEM  91 126 153 154 127   1  0.
    ELEM  92 127 154 155 128   1  0.
    ELEM  93 128 155 156 129   1  0.
    ELEM  94 129 156 157 130   1  0.
    ELEM  95 130 157 158 131   1  0.
    ELEM  96 131 158 159 132   1  0.
    ELEM  97 132 159 160 133   1  0.
    ELEM  98 133 160 161 134   1  0.
    ELEM  99 134 161 162 135   1  0.
    ELEM 100 135 162 163 136   1  0.
    ELEM 101 136 163 164 137   1  0.
    ELEM 102 137 164 165 138   1  0.
    ELEM 103 138 165 166 139   1  0.
    ELEM 104 139 166 167 140   1  0.
    ELEM 105 140 167 168 141   1  0.
    ELEM 106 141 168 169 142   1  0.
    ELEM 107 142 169 170 143   1  0.
```

```
ELEM 108 143 170 171 144 1 0.
ELEM 109 145 172 173 146 1 0.
ELEM 110 146 173 174 147 1 0.
ELEM 111 147 174 175 148 1 0.
ELEM 112 148 175 176 149 1 0.
ELEM 113 149 176 177 150 1 0.
ELEM 114 150 177 178 151 1 0.
ELEM 115 151 178 179 152 1 0.
ELEM 116 152 179 180 153 1 0.
ELEM 117 153 180 181 154 1 0.
ELEM 118 154 181 182 155 1 0.
ELEM 119 155 182 183 156 1 0.
ELEM 120 156 183 184 157 1 0.
ELEM 121 157 184 185 158 1 0.
ELEM 122 158 185 186 159 1 0.
ELEM 123 159 186 187 160 1 0.
ELEM 124 160 187 188 161 1 0.
ELEM 125 161 188 189 162 1 0.
ELEM 126 162 189 190 163 1 0.
ELEM 127 163 190 191 164 1 0.
ELEM 128 164 191 192 165 1 0.
ELEM 129 165 192 193 166 1 0.
ELEM 130 166 193 194 167 1 0.
ELEM 131 167 194 195 168 1 0.
ELEM 132 168 195 196 169 1 0.
ELEM 133 169 196 197 170 1 0.
ELEM 134 170 197 198 171 1 0.
ELEM 135 199 219 220 200 2 0.
GELEM 153 217 237 238 218 2 0. 1
ELEM 154 219 239 240 220 2 0.
GELEM 172 237 257 258 238 2 0. 1
ELEM 173 239 259 260 240 2 0.
GELEM 191 257 277 278 258 2 0. 1
ELEM 192 259 279 280 260 2 0.
GELEM 210 277 297 298 278 2 0. 1
ELEM 211 279 299 300 280 2 0.
GELEM 229 297 317 318 398 2 0. 1
ELEM 230 299 319 320 300 2 0.
GELEM 248 317 337 338 318 2 0. 1
ELEM 249 319 339 340 320 2 0.
GELEM 267 337 357 358 338 2 0. 1
ELEM 268 339 359 360 340 2 0.
GELEM 286 357 377 378 358 2 0. 1
ELEM 287 359 379 380 360 2 0.
GELEM 305 377 397 398 378 2 0. 1
ELEM 306 379 399 400 380 2 0.
GELEM 324 397 417 418 398 2 0. 1
ELEM 325 399 419 420 400 2 0.
GELEM 343 417 437 438 418 2 0. 1
ELEM 344 419 439 440 420 2 0.
GELEM 362 437 457 458 438 2 0. 1
ELEM 363 459 479 480 460 2 0.
GELEM 381 477 497 498 478 2 0. 1
ELEM 382 479 499 500 480 2 0.
GELEM 400 497 517 518 498 2 0. 1
ELEM 401 499 519 520 500 2 0.
GELEM 419 517 537 538 518 2 0. 1
ELEM 420 519 539 540 520 2 0.
GELEM 438 537 557 558 538 2 0. 1
ELEM 439 539 559 560 540 2 0.
GELEM 457 557 577 578 558 2 0. 1
ELEM 458 559 579 580 560 2 0.
GELEM 476 577 597 598 578 2 0. 1
ELEM 477 579 599 600 580 2 0.
GELEM 495 597 617 618 598 2 0. 1
ELEM 496 599 619 620 600 2 0.
GELEM 514 617 637 638 618 2 0. 1
ELEM 515 619 639 640 620 2 0.
GELEM 533 637 657 658 638 2 0. 1
ELEM 534 639 659 660 640 2 0.
GELEM 552 657 677 678 658 2 0. 1
ELEM 553 659 679 680 660 2 0.
GELEM 571 677 697 698 678 2 0. 1
ELEM 572 679 699 700 680 2 0.
GELEM 590 697 717 718 698 2 0. 1
FRONTIER
F 1 F20 NO NO NO
F 1 NO NO NO F20
F 2 NO NO NO F20
F 3 NO NO NO F20
F 4 NO NO NO F20
F 5 NO NO NO F20
F 6 NO NO NO F20
F 7 NO NO NO F20
F 8 NO NO NO F20
F 9 NO NO NO F20
F 10 NO NO NO F20
F 11 NO NO NO F20
F 12 NO NO NO F20
F 13 NO NO NO F20
F 14 NO NO NO F20
F 15 NO NO NO F20
F 16 NO NO NO F20
F 17 NO NO NO F20
F 18 NO NO NO F20
F 19 NO NO NO F20
F 20 NO NO NO F20
F 21 NO NO NO F20
F 22 NO NO NO F20
F 23 NO NO NO F20
F 24 NO NO NO F20
F 25 NO NO NO F20
F 26 NO NO F20 F20
F 26 NO NO NO F20
F 27 F20 NO NO NO
F 83 FISO NO NO NO
F 109 FISO NO NO NO
F 109 NO FISO NO NO
F 110 NO FISO NO NO
F 111 NO FISO NO NO
F 112 NO FISO NO NO
F 113 NO FISO NO NO
F 114 NO FISO NO NO
F 115 NO FISO NO NO
F 116 NO FISO NO NO
F 117 NO FISO NO NO
F 118 NO FISO NO NO
F 119 NO FISO NO NO
F 120 NO FISO NO NO
F 121 NO FISO NO NO
F 122 NO FISO NO NO
F 123 NO FISO NO NO
F 124 NO FISO NO NO
F 125 NO FISO NO NO
F 126 NO FISO NO NO
F 127 NO FISO NO NO
F 128 NO FISO NO NO
F 129 NO FISO NO NO
F 130 NO FISO NO NO
F 131 NO FISO NO NO
F 132 NO FISO NO NO
```

```
   F  133        NO     FISO        NO        NO
   F  134        NO     FISO        NO        NO
   F   52        NO       NO       F20        NO
   F  108        NO       NO      FISO        NO
   F  108        NO       NO      FISO        NO
   F  134        NO       NO      FISO        NO
   F  347        NO     FISO        NO        NO
   GF 362        NO     FISO        NO        NO        1
   F  572        NO     FISO        NO        NO
   GF 587        NO     FISO        NO        NO        1
   F  138        NO       NO        NO       F20
   GF 153        NO       NO        NO       F20        1
   F  363        NO       NO        NO       F20
   GF 378        NO       NO        NO       F20        1
 END_FRONT
  SYMMETRY
   END_SYM
 PRECISION     1.E-3
 MATERIALS
  STEELEC3
                25.       9.      0.50
 SILCONCEC2
         56.      25.       9.      0.50
     TIME
              12.     3600.
  END_TIME
  LARGEDISPL
  EPSTH
IMPRESSION
 TIMEPRINT
              60.     3600.
END_TIMEPR
```

A.3 Archivo.IN del análisis estático de la respuesta mecánica de tres pórticos con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor con fuego NATURAL en el pórtico intermedio

A simple frame
Input file for SAFIR2004

```
NPTTOT     68296
    NNODE   218
     NDIM    2
 NDIMMATER    1
   NDDLMAX    3
     FROM    1   TO   13 STEP    2 NDDL    3
     FROM    2   TO   12 STEP    2 NDDL    1
     FROM   14  TO   34 STEP    2 NDDL    3
     FROM   15  TO   33 STEP    2 NDDL    1
     FROM   35  TO   47 STEP    2 NDDL    3
     FROM   36  TO   46 STEP    2 NDDL    1
     FROM   48  TO   56 STEP    2 NDDL    1
     FROM   13  TO   57 STEP    2 NDDL    3
     FROM   58  TO   78 STEP    2 NDDL    3
     FROM   59  TO   77 STEP    2 NDDL    1
     FROM   79  TO   88 STEP    2 NDDL    3
     FROM   80  TO   87 STEP    2 NDDL    1
     FROM   89  TO  109 STEP    2 NDDL    3
     FROM   90  TO  108 STEP    2 NDDL    1
     FROM  110  TO  122 STEP    2 NDDL    3
     FROM  111  TO  121 STEP    2 NDDL    1
     FROM  123  TO  143 STEP    2 NDDL    3
     FROM  124  TO  142 STEP    2 NDDL    1
     FROM  144  TO  153 STEP    2 NDDL    3
     FROM  145  TO  152 STEP    2 NDDL    1
     FROM  154  TO  174 STEP    2 NDDL    3
     FROM  155  TO  173 STEP    2 NDDL    1
     FROM  175  TO  187 STEP    2 NDDL    3
     FROM  176  TO  186 STEP    2 NDDL    1
     FROM  188  TO  208 STEP    2 NDDL    3
     FROM  189  TO  207 STEP    2 NDDL    1
     FROM  209  TO  218 STEP    2 NDDL    3
     FROM  210  TO  217 STEP    2 NDDL    1
 END_NDDL
   STATIC    PURE_NR
    NLOAD    1
  OBLIQUE    0
 COMEBACK        1.
LARGEUR11      6275
LARGEUR12       100
  NORENUM
    NMAT    2
 ELEMENTS
    BEAM  104    6
     NG    2
```

```
   NFIBER  460
END_ELEM
   NODES
    NODE    1   0.00000   0.00000
   GNODE   11   0.00000   4.62850    1
   NODE    12   0.00000   4.80775
   NODE    13   0.00000   4.98700
   NODE    14   0.00000   4.98700
   GNODE   34   9.80500   4.98700    1
   NODE    35   9.80500   4.98700
   NODE    36   9.80500   4.80775
   NODE    37   9.80500   4.62850
   GNODE   47   9.80500   0.00000    1
   NODE    48   0.00000   5.16625
   NODE    49   0.00000   5.55420
   GNODE   57   0.00000   9.25700    1
   NODE    58   0.00000   9.25700
   GNODE   78   9.80500   9.25700    1
   NODE    79   9.80500   9.25700
   GNODE   88   9.80500   5.16625    1
   NODE    89   9.80500   4.98700
   GNODE  109  19.61000   4.98700    1
   NODE   110  19.61000   4.98700
   NODE   111  19.61000   4.80775
   NODE   112  19.61000   4.62850
   GNODE  122  19.61000   0.00000    1
   NODE   123   9.80500   9.25700
   GNODE  143  19.61000   9.25700    1
   NODE   144  19.61000   9.25700
   GNODE  152  19.61000   5.55420    1
   NODE   153  19.61000   5.16625
   NODE   154   0.00000   4.98700
   GNODE  174  -9.80500   4.98700    1
   NODE   175  -9.80500   4.98700
   NODE   176  -9.80500   4.80775
   NODE   177  -9.80500   4.62850
   GNODE  187  -9.80500   0.00000    1
   NODE   188   0.00000   9.25700
   GNODE  208  -9.80500   9.25700    1
   NODE   209  -9.80500   9.25700
   GNODE  218  -9.80500   5.16625    1
 FIXATIONS
   BLOCK    1          F0      F0      F0
   BLOCK   47          F0      F0      F0
   BLOCK  122          F0      F0      F0
   BLOCK  187          F0      F0      F0
   SAME   13  14  YES  YES  NO
   SAME   34  35  YES  YES  NO
   SAME   57  58  YES  YES  NO
   SAME   78  79  YES  YES  NO
   SAME   35  89  YES  YES  NO
   SAME   79  123  YES  YES  NO
   SAME  143  144  YES  YES  NO
   SAME  109  110  YES  YES  NO
   SAME  188   57  YES  YES  NO
   SAME  208  209  YES  YES  NO
   SAME  154   13  YES  YES  NO
   SAME  174  175  YES  YES  NO
END_FIX
 NODOFBEAM
HEB220PROT.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
vigaprot.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
PERFIL_Z.tem
 TRANSLATE    1    1
END_TRANS
HEB220PROT_AMB.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
vigaprot_amb.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
PERFIL_Z_AMB.tem
 TRANSLATE    1    1
END_TRANS
ELEM     1    1    2    3    1
GELEM    5    9   10   11    1    2
ELEM     6   11   12   13    1
ELEM     7   14   15   16    2
GELEM   16   32   33   34    2    2
ELEM    17   35   36   37    1
ELEM    18   37   38   39    1
GELEM   22   45   46   47    1    2
ELEM    23   13   48   49    1
ELEM    24   49   50   51    1
GELEM   27   55   56   57    1    2
ELEM    28   58   59   60    3
GELEM   37   76   77   78    3    2
ELEM    38   79   80   81    1
GELEM   41   85   86   87    1    2
ELEM    42   87   88   35    1
ELEM    43   89   90   91    5
ELEM    44   91   92   93    5
GELEM   52  107  108  105    5    2
ELEM    53  110  111  112    4
ELEM    54  112  113  114    4
GELEM   58  120  121  122    4    2
ELEM    59  123  124  125    6
GELEM   68  141  142  143    6    2
ELEM    69  144  145  146    4
GELEM   72  150  151  152    4    2
ELEM    73  152  153  110    4
ELEM    74  154  155  156    5
GELEM   83  172  173  174    5    2
ELEM    84  175  176  177    4
ELEM    85  177  178  179    4
GELEM   89  185  186  187    4    2
ELEM    90  188  189  190    6
GELEM   99  206  207  208    6    2
ELEM   100  209  210  211    4
GELEM  103  215  216  217    4    2
ELEM   104  217  218  175    4
 PRECISION     1.E-7
    LOADS
  FUNCTION       F1
  NODELOAD       57       0.   -51168.    0.
  NODELOAD       79       0.   -51168.    0.
  NODELOAD      144       0.   -51168.    0.
  NODELOAD      209       0.   -51168.    0.
 DISTRBEAM       7       0.   -41361.
GDISTRBEAM      16       0.   -41361.    1
 DISTRBEAM      28       0.   -616.2
GDISTRBEAM      37       0.   -616.2     1
 DISTRBEAM      43       0.   -41361.
```

```
GDISTRBEAM      52      0.  -41361.   1
 DISTRBEAM      59      0.  -616.2
GDISTRBEAM      68      0.  -616.2    1
 DISTRBEAM      74      0.  -41361.
GDISTRBEAM      83      0.  -41361.   1
 DISTRBEAM      90      0.  -616.2
GDISTRBEAM      99      0.  -616.2    1
END_LOAD
 MATERIALS
  STEELEC3
   210.E9      0.3   355.0E6
INSULATION

          0.044      0       250         0        25         9
0.5
     TIME
              1.       1.
             15.      16.
             16.    3600.
END_TIME
LARGEDISPL
    EPSTH
IMPRESSION
 TIMEPRINT
              1.    3600.
END_TIMEPR
  PRINTMN
PRINTREACT
```

A.4 Archivo.IN del análisis dinámico de la respuesta mecánica de tres pórticos con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30 mm de espesor con fuego NATURAL en el pórtico intermedio

```
A simple frame
Input file for SAFIR2004

   NPTTOT     68296
    NNODE   218
     NDIM    2
 NDIMMATER    1
  NDDLMAX    3
     FROM    1   TO   13 STEP    2 NDDL    3
     FROM    2   TO   12 STEP    2 NDDL    1
     FROM   14  TO   34 STEP    2 NDDL    3
     FROM   15  TO   33 STEP    2 NDDL    1
     FROM   35  TO   47 STEP    2 NDDL    3
     FROM   36  TO   46 STEP    2 NDDL    1
     FROM   48  TO   56 STEP    2 NDDL    1
     FROM   13  TO   57 STEP    2 NDDL    3
     FROM   58  TO   78 STEP    2 NDDL    3
     FROM   59  TO   77 STEP    2 NDDL    1
     FROM   79  TO   88 STEP    2 NDDL    3
     FROM   80  TO   87 STEP    2 NDDL    1
     FROM   89  TO  109 STEP    2 NDDL    3
     FROM   90  TO  108 STEP    2 NDDL    1
     FROM  110  TO  122 STEP    2 NDDL    3
     FROM  111  TO  121 STEP    2 NDDL    1
     FROM  123  TO  143 STEP    2 NDDL    3
     FROM  124  TO  142 STEP    2 NDDL    1
     FROM  144  TO  153 STEP    2 NDDL    3
     FROM  145  TO  152 STEP    2 NDDL    1
     FROM  154  TO  174 STEP    2 NDDL    3
     FROM  155  TO  173 STEP    2 NDDL    1
     FROM  175  TO  187 STEP    2 NDDL    3
     FROM  176  TO  186 STEP    2 NDDL    1
     FROM  188  TO  208 STEP    2 NDDL    3
     FROM  189  TO  207 STEP    2 NDDL    1
     FROM  209  TO  218 STEP    2 NDDL    3
     FROM  210  TO  217 STEP    2 NDDL    1
END_NDDL
  DYNAMIC    PURE_NR
  DAMPING    0.
   NLOAD    1
  OBLIQUE    0
 COMEBACK    0.0001
LARGEUR11      6275
LARGEUR12       100
  NORENUM
    NMAT    2
 ELEMENTS
    BEAM  104    6
      NG    2
   NFIBER  460
END_ELEM
    NODES
     NODE    1   0.00000   0.00000
    GNODE   11   0.00000   4.62850    1
    NODE    12   0.00000   4.80775
    NODE    13   0.00000   4.98700
    NODE    14   0.00000   4.98700
    GNODE   34   9.80500   4.98700    1
    NODE    35   9.80500   4.98700
    NODE    36   9.80500   4.80775
    NODE    37   9.80500   4.62850
```

```
   GNODE   47   9.80500   0.00000    1
   NODE    48   0.00000   5.16625
   NODE    49   0.00000   5.55420
   GNODE   57   0.00000   9.25700    1
   NODE    58   0.00000   9.25700
   GNODE   78   9.80500   9.25700    1
   NODE    79   9.80500   9.25700
   GNODE   88   9.80500   5.16625    1
   NODE    89   9.80500   4.98700
   GNODE  109  19.61000   4.98700    1
   NODE   110  19.61000   4.98700
   NODE   111  19.61000   4.80775
   NODE   112  19.61000   4.62850
   GNODE  122  19.61000   0.00000    1
   NODE   123   9.80500   9.25700
   GNODE  143  19.61000   9.25700    1
   NODE   144  19.61000   9.25700
   GNODE  152  19.61000   5.55420    1
   NODE   153  19.61000   5.16625
   NODE   154   0.00000   4.98700
   GNODE  174  -9.80500   4.98700    1
   NODE   175  -9.80500   4.98700
   NODE   176  -9.80500   4.80775
   NODE   177  -9.80500   4.62850
   GNODE  187  -9.80500   0.00000    1
   NODE   188   0.00000   9.25700
   GNODE  208  -9.80500   9.25700    1
   NODE   209  -9.80500   9.25700
   GNODE  218  -9.80500   5.16625    1
 FIXATIONS
   BLOCK    1          F0       F0       F0
   BLOCK   47          F0       F0       F0
   BLOCK  122          F0       F0       F0
   BLOCK  187          F0       F0       F0
   SAME   13  14  YES  YES  NO
   SAME   34  35  YES  YES  NO
   SAME   57  58  YES  YES  NO
   SAME   78  79  YES  YES  NO
   SAME   35  89  YES  YES  NO
   SAME   79  123  YES  YES  NO
   SAME  143  144  YES  YES  NO
   SAME  109  110  YES  YES  NO
   SAME  188   57  YES  YES  NO
   SAME  208  209  YES  YES  NO
   SAME  154   13  YES  YES  NO
   SAME  174  175  YES  YES  NO
END_FIX
 NODOFBEAM
HEB220PROT.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
vigaprot.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
PERFIL_Z.tem
 TRANSLATE    1    1
END_TRANS
HEB220PROT_AMB.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
vigaprot_amb.tem
 TRANSLATE    1    1
 TRANSLATE    2    2
END_TRANS
PERFIL_Z_AMB.tem
 TRANSLATE    1    1
END_TRANS
ELEM     1    1    2    3    1
GELEM    5    9   10   11    1    2
ELEM     6   11   12   13    1
ELEM     7   14   15   16    2
GELEM   16   32   33   34    2    2
ELEM    17   35   36   37    1
ELEM    18   37   38   39    1
GELEM   22   45   46   47    1    2
ELEM    23   13   48   49    1
ELEM    24   49   50   51    1
GELEM   27   55   56   57    1    2
ELEM    28   58   59   60    3
GELEM   37   76   77   78    3    2
ELEM    38   79   80   81    1
GELEM   41   85   86   87    1    2
ELEM    42   87   88   35    1
ELEM    43   89   90   91    5
ELEM    44   91   92   93    5
GELEM   52  107  108  105    5    2
ELEM    53  110  111  112    4
ELEM    54  112  113  114    4
GELEM   58  120  121  122    4    2
ELEM    59  123  124  125    6
GELEM   68  141  142  143    6    2
ELEM    69  144  145  146    4
GELEM   72  150  151  152    4    2
ELEM    73  152  153  110    4
ELEM    74  154  155  156    5
GELEM   83  172  173  174    5    2
ELEM    84  175  176  177    4
ELEM    85  177  178  179    4
GELEM   89  185  186  187    4    2
ELEM    90  188  189  190    6
GELEM   99  206  207  208    6    2
ELEM   100  209  210  211    4
GELEM  103  215  216  217    4    2
ELEM   104  217  218  175    4
 PRECISION     1.E-7
    LOADS
  FUNCTION       F1
  NODELOAD       57       0.   -51168.    0.
  NODELOAD       79       0.   -51168.    0.
  NODELOAD      144       0.   -51168.    0.
  NODELOAD      209       0.   -51168.    0.
 DISTRBEAM       7       0.   -41361.
GDISTRBEAM       16       0.   -41361.    1
 DISTRBEAM       28       0.   -616.2
GDISTRBEAM       37       0.   -616.2     1
 DISTRBEAM       43       0.   -41361.
GDISTRBEAM       52       0.   -41361.    1
 DISTRBEAM       59       0.   -616.2
GDISTRBEAM       68       0.   -616.2     1
 DISTRBEAM       74       0.   -41361.
GDISTRBEAM       83       0.   -41361.    1
 DISTRBEAM       90       0.   -616.2
GDISTRBEAM       99       0.   -616.2     1
END_LOAD
    MASS
   M_BEAM      1     7150.0
   GM_BEAM     6     7150.0      1
   M_BEAM      7     7150.0
```

```
GM_BEAM     16     7150.0       1
M_BEAM     17     7150.0
GM_BEAM     22     7150.0       1
M_BEAM     23     7150.0
GM_BEAM     27     7150.0       1
M_BEAM     28     600.
GM_BEAM     37     600.         1
M_BEAM     38     7150.0
GM_BEAM     42     7150.0       1
M_BEAM     43     7150.0
GM_BEAM     52     7150.0       1
M_BEAM     53     7150.0
GM_BEAM     58     7150.0       1
M_BEAM     59     600.
GM_BEAM     68     600.         1
M_BEAM     69     7150.0
GM_BEAM     73     7150.0       1
M_BEAM     74     7150.0
GM_BEAM     83     7150.0       1
M_BEAM     84     7150.0
GM_BEAM     89     7150.0       1
M_BEAM     90     600.
GM_BEAM     99     600.         1
M_BEAM    100     7150.0
GM_BEAM    104     7150.0       1
END_MASS
MATERIALS
STEELEC3
210.E9       0.3   355.0E6
INSULATION
0.044       0       250         0         25         9
0.5
TIME
30.     1800.      1000
END_TIME
LARGEDISPL
EPSTH
IMPRESSION
TIMEPRINT
30.    3600.
END_TIMEPR
PRINTMN
PRINTREACT
```

Anexo B. Modelos de cálculo simplificado

B.1 Campo de aplicación de la EN 1993

La Norma EN 1993 es aplicable al cálculo de estructuras de acero en edificios y obras de ingeniería civil. Esta norma cumple los principios y requisitos de seguridad y de servicio de las estructuras, que sirven de base para el cálculo y verificación de éstas, establecidos en la Norma EN 1990 - Bases de cálculo de estructuras.

La Norma EN 1993 solamente tiene en cuenta los requisitos de resistencia, servicio, durabilidad, y resistencia al fuego de las estructuras de acero. No se tienen en cuenta otros requisitos como, por ejemplo, los relacionados con el aislamiento térmico o acústico.

La Norma EN 1993 está prevista para ser utilizada conjuntamente con:
– La Norma EN 1990 “Bases de cálculo de estructuras”
– La Norma EN 1991 “Acciones en estructuras”
– Las Normas para productos de construcción pertinentes para estructuras de acero
– La Norma EN 1090 “Ejecución de estructuras de acero”
– La Norma EN 1998 “Cálculo de estructuras sismorresistentes”, cuando las estructuras de acero se construyan en regiones sísmicas

La Norma EN 1993 está subdividida en seis partes:
– La Norma EN 1993-1 Proyecto de Estructuras de Acero: Reglas Generales.
– La Norma EN 1993-2 Proyecto de Estructuras de Acero: Puentes.
– La Norma EN 1993-3 Proyecto de Estructuras de Acero: Torres, mástiles y chimeneas.
– La Norma EN 1993-4 Proyecto de Estructuras de Acero: Silos, depósitos y conducciones.
– La Norma EN 1993-5 Proyecto de Estructuras de Acero: Pilotes y tablestacas.
– La Norma EN 1993-6 Proyecto de Estructuras de Acero: Vigas Carril.
Campo de aplicación de la EN 1993-1-2

B.2 Campo de aplicación de la EN 1993-1-2

(1) La Norma EN 1993-1-2 trata sobre el proyecto de estructuras de acero para la situación accidental de exposición al fuego y está prevista para ser utilizada conjuntamente con las Normas EN 1993-1-1 y EN 1991-1-2. La Norma EN 1993-1-2 solamente añade diferencias o suplementos respecto al cálculo a temperatura ambiente.

(2) La Norma EN 1993-1-2 trata únicamente los métodos pasivos de protección frente al fuego.

(3) La Norma EN 1993-1-2 es aplicable a las estructuras de acero a las que se exige cumplir su función de capacidad portante ante incendio, para evitar su colapso prematuro.

NOTA: Esta parte no incluye reglas para los elementos de separación.

(4) La Norma EN 1993-1-2 proporciona los principios y reglas de aplicación para el proyecto de estructuras con requisitos específicos respecto a la función de capacidad portante y a los niveles de prestaciones.

(5) La Norma EN 1993-1-2 es aplicable a estructuras o a partes de estructuras que están dentro del campo de aplicación de la Norma EN 1993-1 y que están proyectados en consecuencia a ella.

(6) Los métodos proporcionados son aplicables a las calidades del acero estructural S235, S275, S355, S420 y S460 de la Norma EN 10025 y a todas las calidades de las Normas UNE - EN 10210 y UNE - EN 10219.

(7) Los métodos proporcionados son también aplicables a los elementos de acero conformado en frío y de revestimiento dentro del ámbito de aplicación de la Norma EN 1993-1-3.

(8) Los métodos proporcionados son aplicables a cualquier calidad del acero para la que se encuentren disponibles las propiedades materiales a temperaturas elevadas, en base a las Normas Europeas armonizadas.

(9) Los métodos incluidos son también aplicables a elementos y soportes de revestimiento de acero inoxidable, dentro del ámbito de aplicación de la Norma EN 1993-1-4.

NOTA: Para la resistencia al fuego de estructuras mixtas de acero y hormigón, consúltese la Norma EN
1994-1-2.

Anexo C. Impacto ambiental

C.1 Impacto ambiental accidental de un incendio

El impacto ambiental de un incendio en el conjunto de naves industriales de este proyecto sería significativo debido a:

- Las emisiones atmosféricas
- El agua vertida a la red municipal proveniente de la extinción del incendio.
- Los residuos provocados por el incendio

Con un incendio accidental se produce una emisión anormal de partículas a la atmósfera, emisión de humos. Por tanto hay que tomar medidas preventivas como:

- manual de autoprotección
- medios técnicos de extinción de incendios
- no fumar, ni encender llama en zonas con materiales inflamables
- medidas de seguridad en el almacenamiento de sustancias
- formación del personal

Aunque si, a pesar de todas estas precauciones, hubiese vertidos de aguas de incendio a la red de alcantarillado, el Plan de emergencia ya prevé el aviso inmediato a EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales).

Se instalará un sistema de abastecimiento de agua contra incendios (red de agua contra incendios), si:

a) Lo exigen las disposiciones vigentes que regulan actividades industriales sectoriales o específicas, de acuerdo con el artículo 1 del RSIEI.

b) Cuando sea necesario para dar servicio, en las condiciones de caudal, presión y reserva calculados, a uno o varios sistemas de lucha contra incendios, tales como:
- Red de bocas de incendio equipadas (BIE).
- Red de hidrantes exteriores.
- Rociadores automáticos.
- Agua pulverizada.
- Espuma.

Las actuaciones de emergencia a llevar a cabo de manera inmediata para reducir las consecuencias del incendio son:
- equipo de primera intervención apague el incendio

La difusión generalizada del fuego en un cuerpo de bosque o matorral a costa de su masa vegetal aérea es un fenómeno complejo de grandes consecuencias: paisajísticas, económicas, deterioro de bienes muebles e inmuebles o su contribución al efecto invernadero, que consiste en la elevación de la temperatura de la atmósfera próxima a la corteza terrestre por la dificultad de disipación de la radiación calorífica, debido a la presencia de una capa de óxidos de carbono que proceden de las combustiones industriales.

C.2 Extinción de Incendios

En caso de incendio deben tomarse las medidas necesarias para que en sus comienzos, pueda ser rápida y eficazmente combatido. Las medidas principales serán, según el caso.

a) Los locales deben disponer de agua y presión y de un número suficiente de tomas o bocas de esa agua con las correspondientes mangueras con lanza.
b) Debe disponerse de una instalación de alarma y de rociadores automáticos de extinción.
c) Debe haber siempre, el número suficiente de extintores de incendio, repartidos convenientemente. La naturaleza del producto extintor debe ser apropiada a la clase del riesgo.
d) Debe disponerse también de recipientes llenos de arena, de cubos, palas, piochas y cubiertas de lona ignífuga.

e) Todo el material de que se disponga para combatir el incendio debe mantenerse en perfecto estado de conservación y funcionamiento, lo cual se comprobará periódicamente.

f) Deben darse a conocer al personal las instrucciones adecuadas sobre salvamento y actuación para el caso de producirse el incendio y deben designarse y aleccionarse convenientemente, aquellos trabajadores que hayan de actuar y manejar el material extintor.

g) Todas las instalaciones eléctricas del establecimiento industrial que sean susceptibles de iniciar o propagar el fuego, cumplen con las exigencias y especificaciones contenidas en las normativas siguientes:

- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.
- NBE-CPI/96
- Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas o peligrosas.

h) Las industrias que ofrezcan peligro de incendio se regirán por el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en establecimientos Industriales.

C.3 Evaluación medioambiental

Entendemos por "medio ambiente" el entorno vital, conjuntos de factores físicos, estéticos, culturales, sociales y económicos que interaccionan con el individuo y con la comunidad en que vive. Por tanto, no es algo envolvente del hombre, sino algo indisociable de él, de su organización y progreso.

Por tanto el concepto de medio ambiente hace referencia al entorno espacial (lo que rodea al hombre) y temporal (uso que hace referido a la herencia cultural e histórica). Tradicionalmente sólo se ha estudiado la viabilidad técnica y económica para evaluar alternativas de diseño, localización, etc., pero en la actualidad es más rentable evaluar el efecto sobre el medio, que tratar posteriormente de remediar el daño producido sobre el mismo, lo cual no siempre es posible.

Sin embargo, la Evaluación de Impacto Ambiental no pretende ser una figura negativa ni obstruccionista, ni un freno al desarrollo, sino un instrumento operativo para impedir sobreexplotaciones del medio natural y buscar un equilibrio entre el desarrollo de la actividad humana y el medio ambiente.

El objetivo que persigue el estudio de impacto medioambiental es valorar los impactos del proyecto sobre el medio natural, establecer medidas correctoras para eliminar o minimizar los impactos y realizar un programa de control y seguimiento de aquellos impactos residuales que así lo aconsejen.
Esta necesidad de detener el deterioro del medio ambiente por la actividad humana y proceder a su protección a través de la regulación de las actividades que puedan dañarlo impulsó la redacción del Real Decreto 1.131/88 del 30 de Septiembre de 1988 por el que se aprobó el "Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/86 de 28 de Junio de 1986, de evaluación de impacto ambiental".

El citado Decreto adapta el derecho interno español de la Directiva 85/377/CEE, sobre Evaluación de los Impactos sobre el Medio Ambiente de Ciertas Obras Públicas y Privadas.

C.4 Terminología básica

- Factores ambientales:

Son los diversos componentes del medio ambiente sobre los cuales se desarrolla la vida en nuestro planeta. Son, por tanto, el soporte de toda actividad humana.
Los factores ambientales considerados por los organismos competentes europeos son:
- El hombre, la flora y la fauna
- El suelo, el agua, el aire, el clima y el paisaje
- Las interacciones entre los anteriores
- Los bienes materiales y el patrimonio cultural

- Promotor o titular del proyecto

Es la persona física o jurídica que solicita una autorización o aprobación definitiva relativa a un proyecto privado, como a la autoridad pública que toma la iniciativa respecto a la aprobación o puesta en marcha de un proyecto.

- Órgano con competencia sustantiva

Es el que, conforme a la legislación aplicable al proyecto de que se trate, ha de conceder la autorización, aprobación, licencia o concesión para su realización.

- Órgano ambiental

Es el que, conforme la Normativa vigente, ostenta la competencia para formular cualquiera de las medidas de prevención ambiental previstas por la legislación autonómica (evaluación de impacto ambiental, informe ambiental y calificación ambiental).

- Impacto Ambiental

Se produce cuando una actividad produce una alteración favorable o desfavorable en el medio o en alguno de sus componentes. Un impacto no implica necesariamente negatividad, ya que puede ser positivo. El impacto de un proyecto es la diferencia entre la situación del medio ambiente futuro modificado, tal y como se manifiesta tras la consecución del proyecto, y la situación del mismo en el futuro, tal y como habría evolucionado normalmente sin tal actuación.

- Evaluación de Impacto Ambiental

Procedimiento de recogida de información, análisis y predicción destinado a anticipar, corregir y prevenir los posibles efectos que una actuación puede tener sobre el medio ambiente.

- Estudio de Impacto Ambiental

Es el conjunto de documentos que deben presentar los titulares de planes, programas, proyectos de construcción, instalaciones y obras públicas o privadas que se determinen reglamentariamente para cada uno de ellos, en los que se recoja y analice la información necesaria para evaluar las consecuencias ambientales de la actuación que se pretende ejecutar.

- Declaración de Impacto Ambiental

Es el pronunciamiento del organismo o autoridad competente en materia de medio ambiente, en base al E.I.A. y otras comunicaciones en el que se determina, respecto a los efectos ambientales previsibles, si la evaluación resulta favorable o desfavorable.

- Informe ambiental

Valorará las repercusiones ambientales de cada propuesta de actuación y determinará la conveniencia o no de ejecutar la misma, especificando si la actuación propuesta se ajusta o no a la normativa ambiental en vigor y, en caso negativo, se indicarán los preceptos legales o reglamentarios que se incumplan.

Anexo D. Gráficos

D.1 Gráficos temperatura - tiempo, temperatura - factor de sección

I.3 Temperatures in protected steel sections

Table I-2 : temperature in protected sections subjected to the ISO fire

k_p [W/m³K]	200	400	600	800	1200	2000
Time [min.]	Steel temperature in °C					
0	20	20	20	20	20	20
10	37	54	70	85	113	163
20	60	97	130	160	215	304
30	84	139	188	232	306	421
40	108	181	244	298	388	514
50	132	222	296	359	459	589
60	156	260	345	414	520	650
70	179	298	391	465	573	699
80	202	333	433	510	620	730
90	225	367	472	552	661	743
100	247	399	509	589	695	773
110	268	430	542	623	721	816
120	289	459	573	654	734	859
130	310	486	602	681	744	900
140	330	512	629	705	765	935
150	349	537	654	723	795	965
160	368	560	677	733	828	990
170	386	582	697	739	861	1013
180	404	603	714	751	892	1032
190	422	623	727	769	921	1049
200	439	642	734	792	948	1065
210	455	660	738	817	972	1078
220	471	677	747	843	993	1090
230	487	692	760	869	1013	1101
240	502	706	777	893	1031	1112

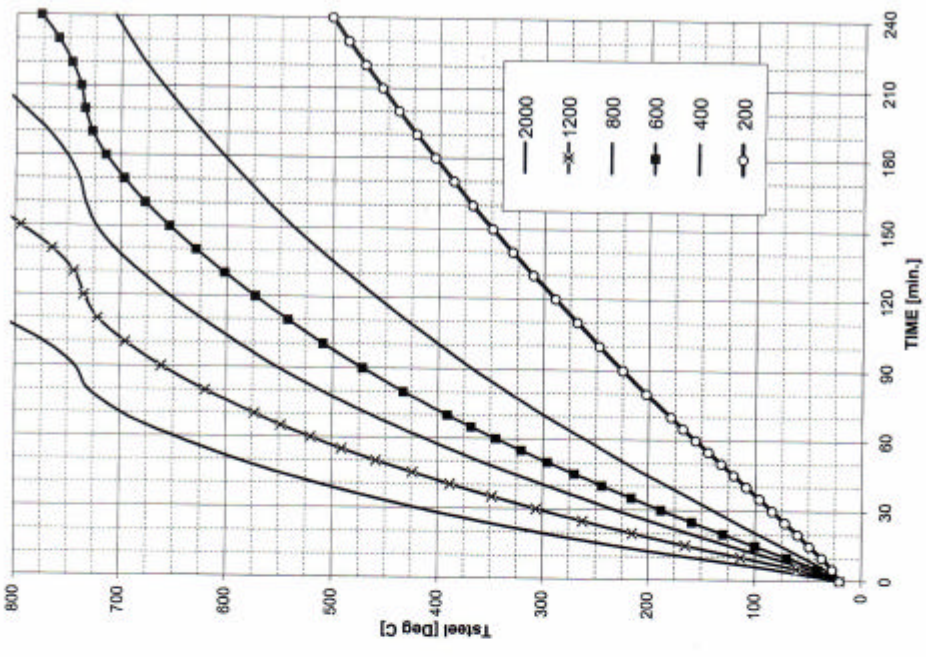


Figure I-5 : temperatures as a function of time for various values of the factor k_p

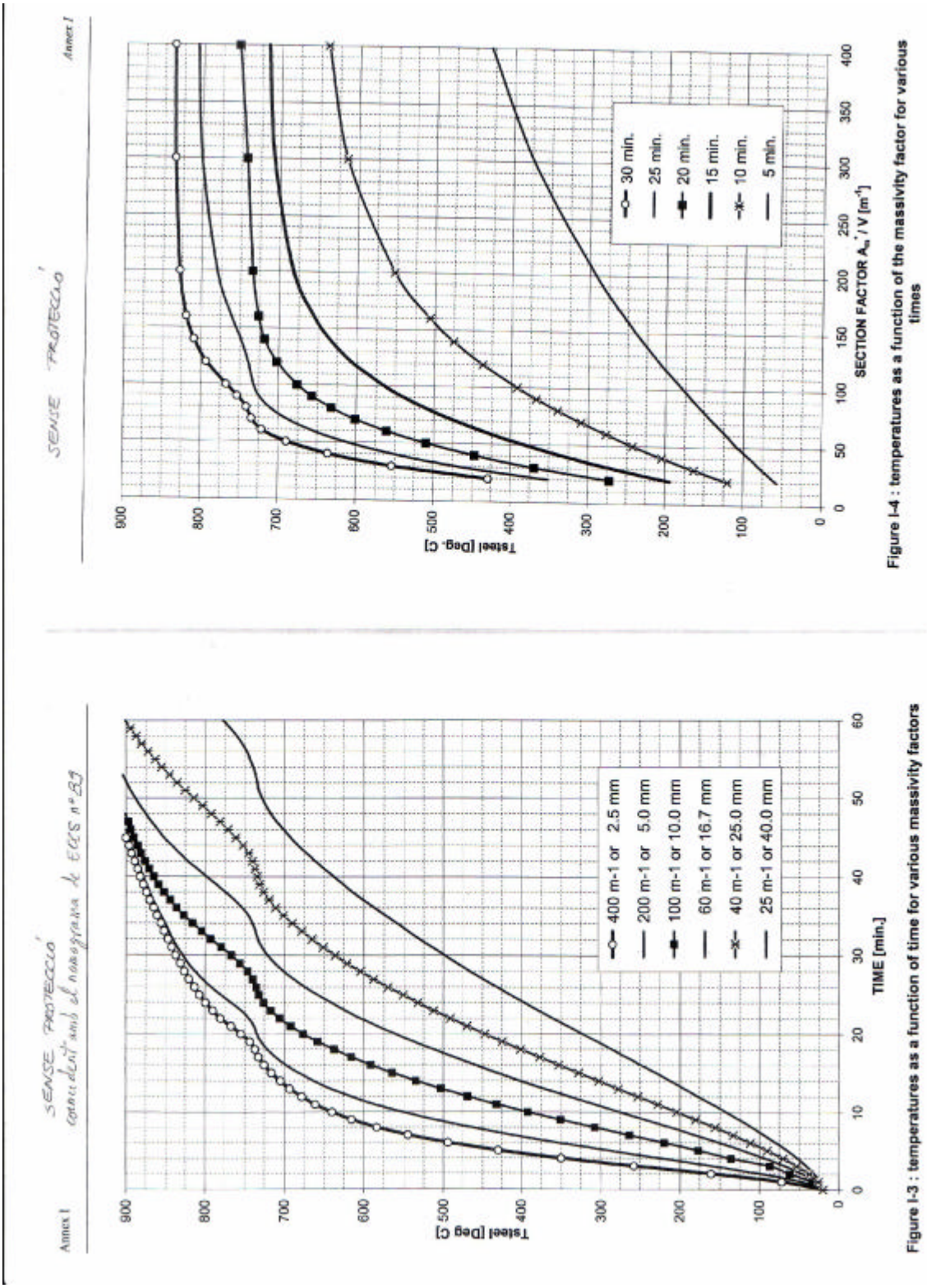


Figure I-3 : temperatures as a function of time for various massivity factors

Figure I-4 : temperatures as a function of the massivity factor for various times

Anexo E. Análisis estático y dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL en un pórtico

E.1 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico de esquina con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

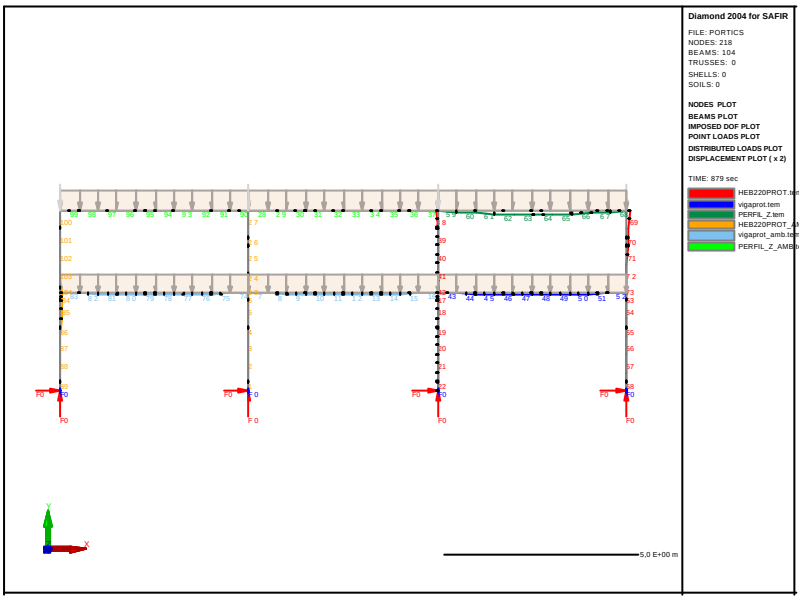


Gráfico con factor de escala: 2. Colapso al cabo de 879s (14.65 min)

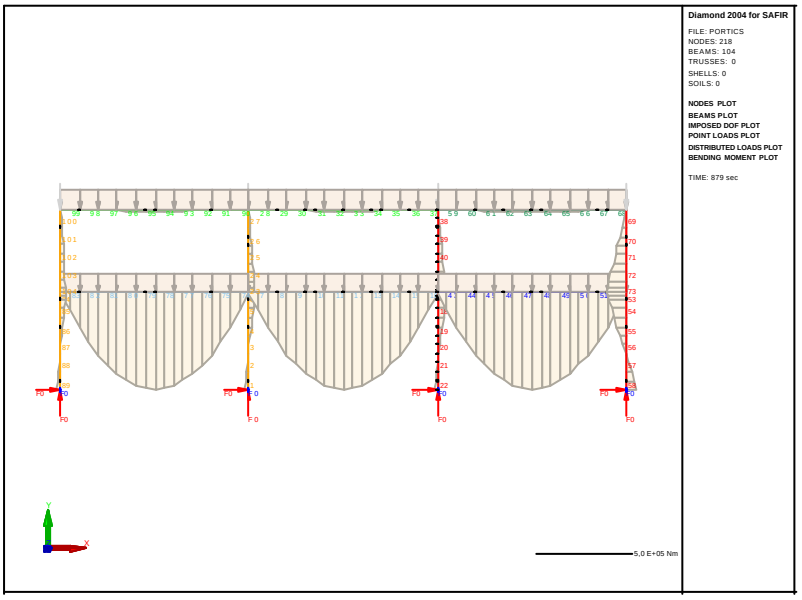


Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

E.2 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso más crítico en el pórtico de esquina con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

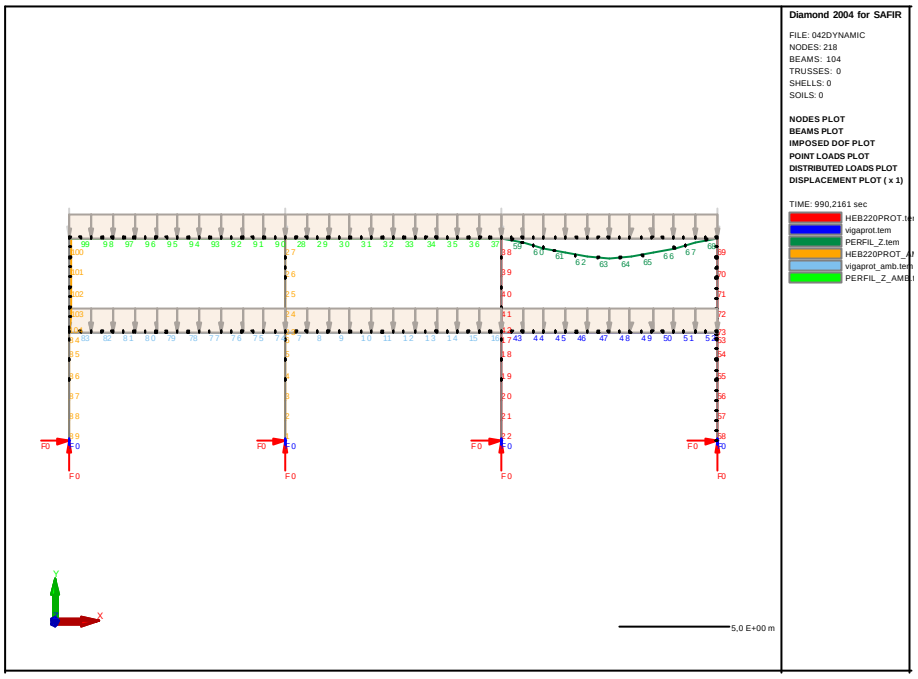


Gráfico con factor de escala: 1. Colapso al cabo de 990.2161s (16.50 min)

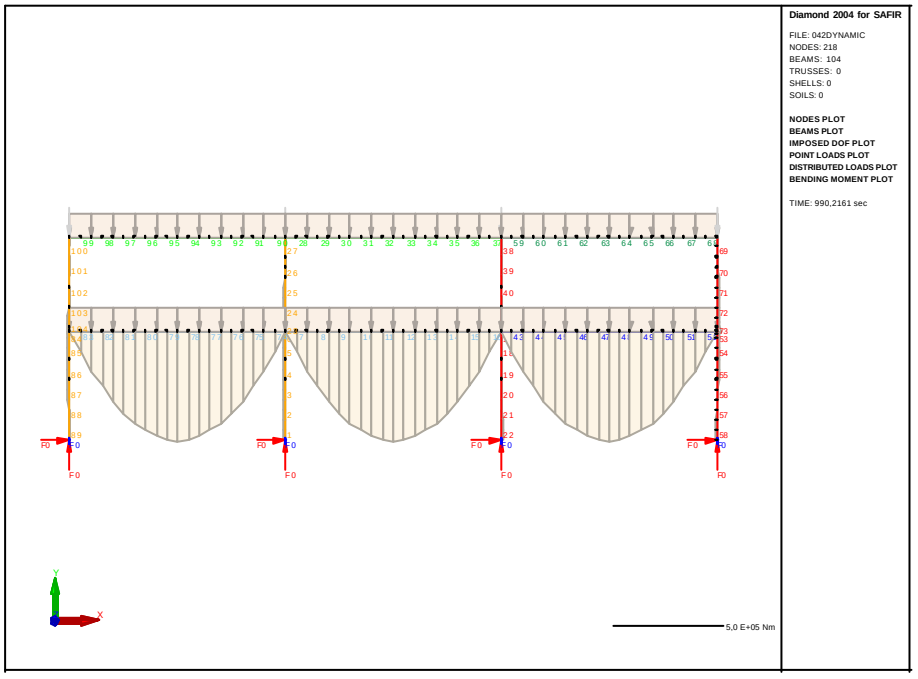


Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

E.3 Análisis estático de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” en el pórtico intermedio con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

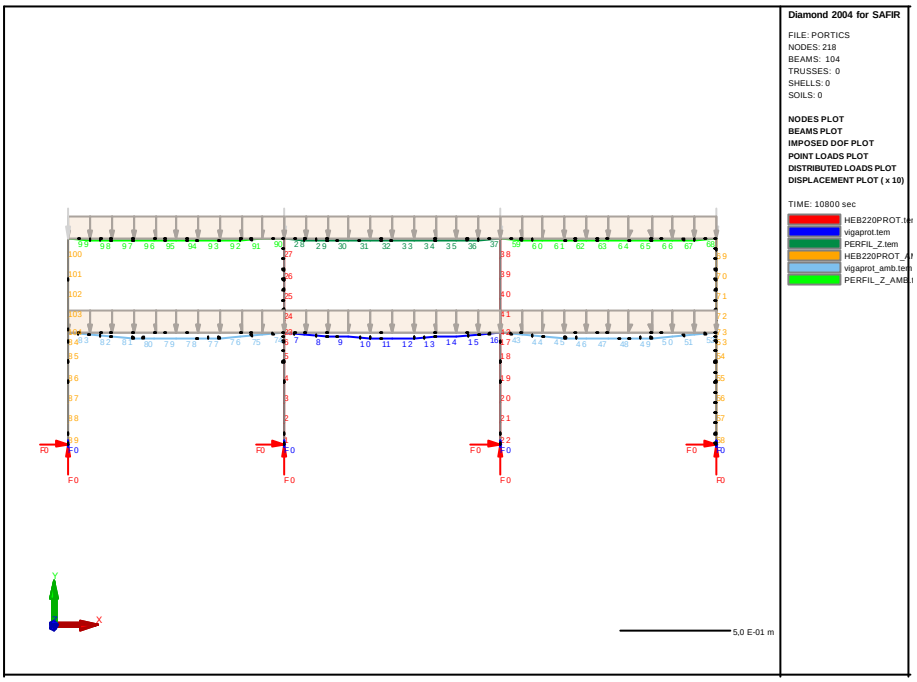


Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s. (3h)

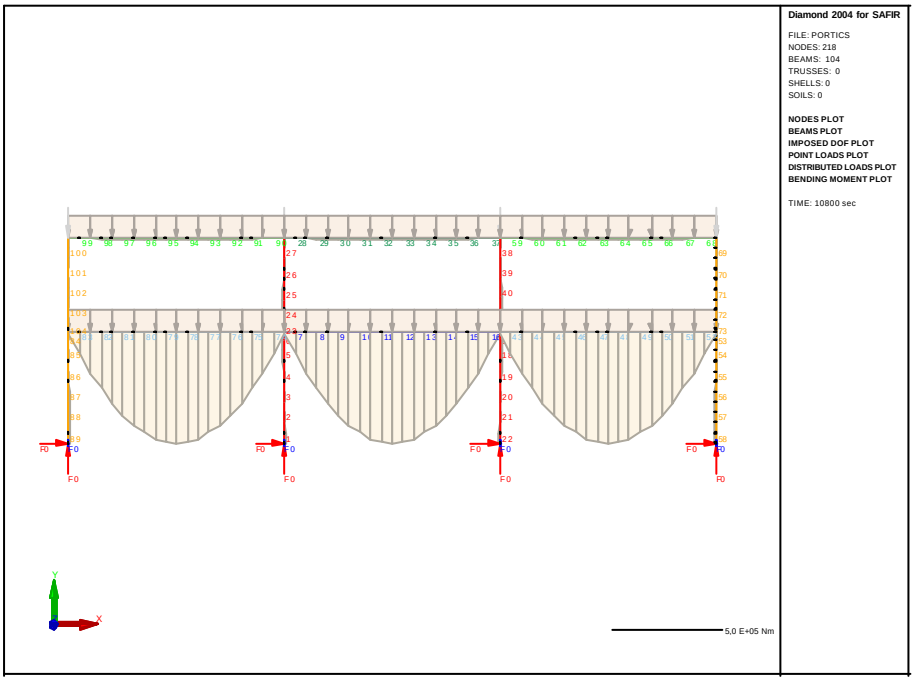


Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

E.4 Análisis dinámico de tres pórticos con fuego NATURAL del caso “realista” en el pórtico intermedio con pilares y viga protegidos con mortero Tecwool F de 30mm de espesor

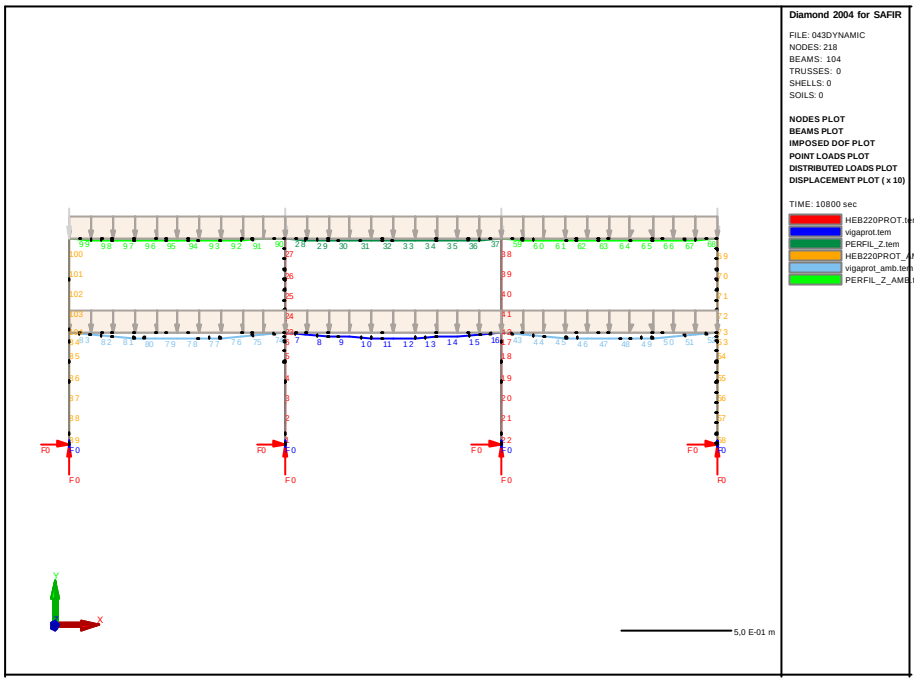


Gráfico con factor de escala: 10. Análisis sin colapso hasta los 10800s. (3h)

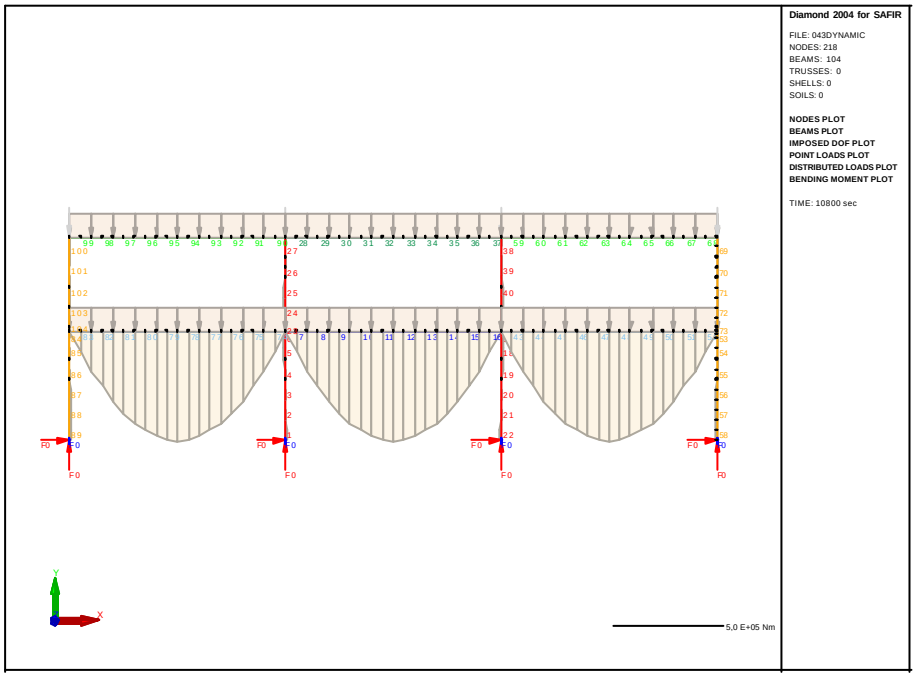


Gráfico con factor de escala: 1Nm=0,00001m

Anexo F. Presupuesto

F.1 Costes del proyecto

Titulo del proyecto:	Estudio del comportamiento termo-mecánico de una estructura metálica sometida a la acción del fuego.
Autor :	Teresa Armengou Lacalle
Fechas:	de marzo 2006 a noviembre 2006

tiempo dedicación		6	meses	
		20	dias al mes	
		5	horas al dia	
	total :	600	horas	
Ingeniero		12	€/h	7200 €
maquinaria		1	ordenador	0 €

El ordinador utilizado para realizar este proyecto es del centro de cálculo del departamento
de Resistencia de materiales y Estructuras en la Ingenieria.

programas y licencias informaticas

SAFIRWIZARD, SAFIR2004, DIAMOND 2004 0 €
ELEFIR EN V1.0, CLASE
son programas disponibles gratuitamente gracias al departamento de Resistencia de materiales y Estructuras en la Ingenieria.

impression	500	paginas	
	0,04	€/pagina	20 €
encuadernación y pégatinas			26,5 €
Coste total del proyecto			**7246,5 €**