

DISEÑO BASADO EN PRESTACIONES FRENTE A LA ACCIÓN DEL FUEGO DEL COMPLEJO DE FUSIÓN NUCLEAR ITER, EN FRANCIA

Performance Based Design Against Fire Situation of the Nuclear Fusion Complex ITER, in France

Carlos MUÑOZ BLANC

Doctor Arquitecto
BAC ENGINEERING CONSULTANCY GROUP
R&D & Product Quality Area Manager
carlos.munoz@coac.net

Alicia SOLER ORCAL

Master en Arquitectura
BAC ENGINEERING CONSULTANCY GROUP
Project Leader
asoler@bacecg.com

Ramón MARGALET DE ZABALO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FERROVIAL AGROMAN SA
Coordinador de diseño
rmargalet@ferrovial.com

Xavier ROS BATLLE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FERROVIAL AGROMAN SA
Responsable de diseño de ITER TB-03
xros@ferrovial.com

RESUMEN

El presente artículo recoge la estrategia de diseño frente a la acción del fuego llevada a cabo en las estructuras de acero que componen diversos edificios del complejo de fusión nuclear ITER, en Francia. Mediante la aplicación del Diseño Basado en Prestaciones, y la utilización de las simulaciones basadas en la Dinámica Computacional de Fluidos, aplicando las teorías de la termodinámica, la combustión y la transferencia de calor, se analiza la respuesta de los entramados resistentes frente a los incendios que pueden llegar a acontecer, y se optimiza la protección frente al fuego, adecuándola a los riesgos reales que se producirán en ITER.

ABSTRACT

This paper shows the design strategy against fire action that was developed in the steel structures that belong to several buildings from nuclear fusion complex ITER, in France. The behaviour of structures under fire situation is analysed by means of the application of Performance Based Design, the use of computational fluid dynamics simulations, and the application of thermodynamics, combustion and heat transfer theories. Fire protection is optimized, adapting it to real risks in ITER.

PALABRAS CLAVE: Diseño Basado en Prestaciones, CFD, Escenario de incendio, optimización

KEYWORDS: Performance Based Design, CFD, Fire scenario, optimization

1. Introducción

ITER, del latín “el camino”, es actualmente uno de los proyectos energéticos más ambiciosos que existen, sino el que más. ITER está emplazado en el sureste de Francia, a unos 80km de Marsella. El objetivo es demostrar que la energía de fusión, basada en el mismo principio físico que la energía del Sol y de las estrellas, generada a gran escala, puede ser viable para aportar una energía limpia, no basada en el uso del carbón. El reactor de fusión se conoce con el nombre de Tokamak, y será el equipo de estas características de mayor dimensión que nunca se ha construido. La finalización con éxito de este proyecto experimental es básica para el futuro desarrollo, a nivel mundial, de la energía no contaminante de fusión.

A nivel energético el objetivo de ITER es demostrar que es factible conseguir una producción energética con un factor $Q=10$, es decir, que aportando una potencia de 50MW la fusión permita obtener 500MW. Aunque ITER no almacenará la energía eléctrica que produzca, sí que abrirá la puerta al diseño de la instalación de fusión que finalmente sea construida con fines productivos.

En la construcción están colaborando actualmente 35 países, habiendo colaborado hasta la fecha miles de ingenieros y científicos, desde que la idea de plantear un experimento de esta naturaleza a nivel mundial fue lanzada en 1985. En este proyecto colaboran desde el inicio 7 miembros: China, la Unión Europea, India, Japón, Corea del Sur, Rusia y los Estados Unidos.

Un aspecto fundamental del diseño de ITER es la manera de afrontar la seguridad de los diferentes edificios frente a la acción del fuego. En un escenario tan complejo como puede ser una instalación de fusión nuclear, con diversos edificios diseñados con estructura de acero para la contención de los equipos necesarios para el correcto funcionamiento del Tokamak, se debe evaluar de manera particular cuales son los riesgos de incendio que pueden producirse, así como las consecuencias y daños se pueden derivar de cada uno de estos riesgos [1-3].

La manera más adecuada y racional de afrontar la seguridad frente al incendio de las estructuras de acero que conforman el complejo de fusión nuclear ITER ha sido mediante el diseño basado en prestaciones (PBD), conociendo en cada edificio que incendios pueden producirse y cómo estos pueden afectar a los entramados resistentes.

2. El Diseño Basado en Prestaciones (PBD)

Para garantizar la seguridad de las estructuras en caso de incendio existen dos aproximaciones diferentes [4-6]. Tradicionalmente han sido las reglas prescriptivas las que han predominado en la concepción de cualquier tipo de edificio. La adopción de una curva normalizada (1) que sirve para determinar unos niveles mínimos de resistencia de los elementos estructurales, verificados en la mayoría de las ocasiones de manera individualizada en los hornos de ensayo, pero que no reproduce en ningún caso las condiciones reales de los incendios en espacios cerrados, ha generado habitualmente unos buenos resultados en lo que al posible colapso de las estructuras de edificación se refiere.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

Sin embargo, el uso de esta curva normalizada deriva en dos problemas fundamentales que han llevado a descartarla en diversos edificios de ITER. En primer lugar, en un gran número de ocasiones el uso de esta curva normalizada provoca un sobre coste innecesario en la construcción, como consecuencia de un sobredimensionamiento en los materiales de protección o

un uso irracional de los mismos para dar respuesta a una acción accidental de muy baja probabilidad de suceso. En segundo lugar, y como contrapartida, en un reducido número de escenarios de incendio el uso de la curva normalizada implica infravalorar las temperaturas máximas que se pueden llegar a alcanzar en una estructura.

Estos dos problemas fundamentales han llevado al equipo de diseño de ITER a optar por el PBD en la determinación de la protección frente al fuego necesaria en las estructuras de acero. Tal y como ya se ha indicado, esto implica tener un conocimiento real de los riesgos de incendio que se derivan de la explotación de ITER y de las instalaciones que va a contener, pudiendo, a partir de la evaluación de dichos riesgos, determinar cuáles son los más críticos.

Conociendo cuales son los riesgos más críticos se puede determinar cómo cada riesgo afecta a la estructura, es decir, que distribución real de temperaturas se produce en caso de incendio, y de qué manera estas temperaturas pueden influir en el comportamiento mecánico del entramado resistente. El conocimiento preciso de la respuesta de la estructura en caso de incendio ha comportado un beneficio muy importante en la construcción de ITER, la racionalización de las protecciones pasivas frente a la acción del fuego, a la vez que se garantiza la seguridad.

Esta racionalización en el uso de las protecciones pasivas frente a la acción del fuego conlleva dos grandes ventajas. En primer lugar, y seguramente la más inmediata, es la reducción de los costes de construcción, ajustando estos costes a la realidad de cada uno de los edificios. Esta reducción en los materiales de protección reduce el coste del material de la obra, disminuye los plazos de ejecución de las obras y, derivado de esto, se reducen los costes de mantenimiento de los productos ignífugos. En segundo lugar, se reducen los materiales químicos utilizados en la construcción de ITER. Cualquier pintura intumescente o mortero que deba proteger una estructura frente a la acción del fuego requiere del uso de unos componentes químicos. La reducción de éstos conlleva la construcción más sostenible de unas instalaciones que pretenden ser el estandarte de la energía limpia del futuro.

2.1. Aplicación del diseño basado en prestaciones (PBD) al *Assembly Building*

El PBD se plantea en aquellos edificios diseñados con estructura de acero. A excepción de aquellos edificios que requieren un nivel de seguridad o contención excepcional, los cuales se han diseñado mediante muros y losas de hormigón armado, el resto han sido planteados con entramados estructurales de acero.

Uno de los edificios en los que se ha llevado a cabo el PBD y en el que se ha logrado un gran ahorro de costes es el *Assembly Building*. En el caso particular de este edificio el objetivo del diseño basado en prestaciones ha sido doble. En primer lugar, garantizar la integridad del entramado resistente principal de la nave en caso de que se produzca un incendio accidental durante la fase de operación nuclear. En segundo lugar, evitar que se produzca el colapso del mismo hacia el Tokamak, anexo a éste. Originariamente, el diseño de este edificio determina que todos los elementos deben garantizar una resistencia al fuego, según métodos prescriptivos, de 2 horas. En el momento en que se decide optar por el PBD se plantea la estrategia de proteger para un mínimo de 2 horas aquellos elementos estructurales que se vean afectados por la acción del fuego. Sin embargo, no se desestima proteger para una mayor resistencia al fuego, dependiendo de los escenarios que finalmente se deriven de la fase nuclear de operaciones.

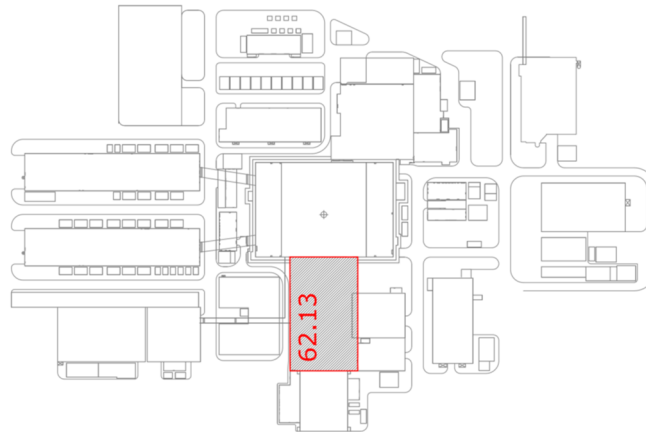


Figura 1. Emplazamiento del Assembly Building en el complejo ITER.

El edificio está diseñado para alojar los trabajos de ensamblaje del Tokamak. Se trata de un edificio anexo al Tokamak, situado al sur del mismo. Ambos edificios tienen un gran volumen interior compartido a través de dos puentes grúa de gran capacidad, que son capaces de levantar conjuntamente componentes de hasta 1,500T.

La estructura del edificio genera un único volumen diáfano de gran dimensión, aproximadamente 99m de largo, 61m de ancho y 60m de alto.

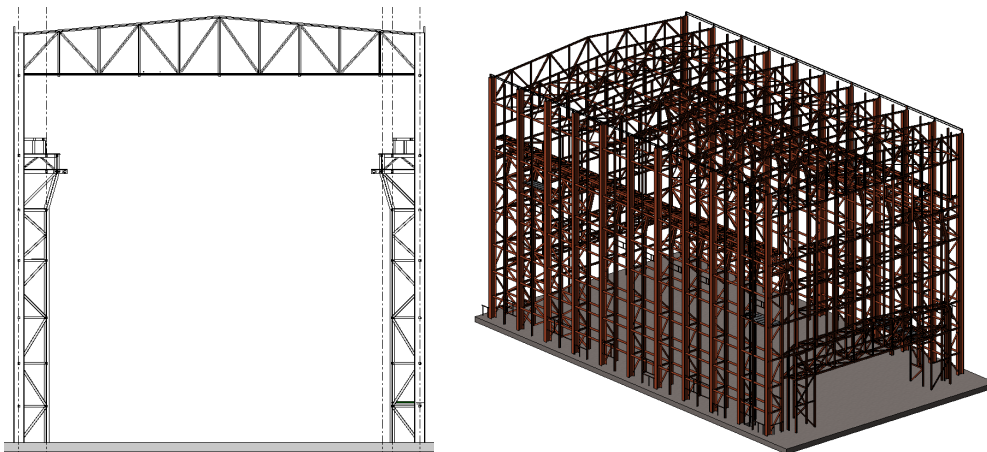


Figura 2. Sección transversal y perspectiva 3D del edificio, extraída del modelo BIM.

2.1.1. Descripción de la estructura

La estructura principal consiste en la disposición de una serie de pórticos de acero separados 9.3m, los cuales están conformados a partir de una cercha tipo Warren soportada en sus extremos mediante dos columnas compuestas, formadas éstas por dos secciones en doble T armadas de 1,500mm y 675mm, separadas 3.8m a eje de piezas.

Las columnas, en forma de cercha vertical, alojan instalaciones, como por ejemplo el sistema HVAC, además de almacenes y salas de control eléctrico en la parte baja del edificio.

La estabilidad horizontal de edificio se garantiza en sentido E-O mediante la propia rigidez de los pórticos transversales. En sentido N-S tiene un potente sistema de arriostramiento en los planos de fachada que garantizan la transmisión de las acciones horizontales (sismo y viento) hasta la cimentación.

Se establece como condición de partida que los dos pórticos más próximos al Tokamak y el sistema de arriostramiento contenido entre ellos se protejan frente a la acción del fuego, independientemente de los resultados que las simulaciones numéricas aporten, con el objetivo de evitar el colapso del edificio hacia el Tokamak. Se pueden ver en la Figura 3 las zonas que se protegen frente a la acción del fuego, independientemente de los resultados que se derivasen del estudio prestacional desarrollado.

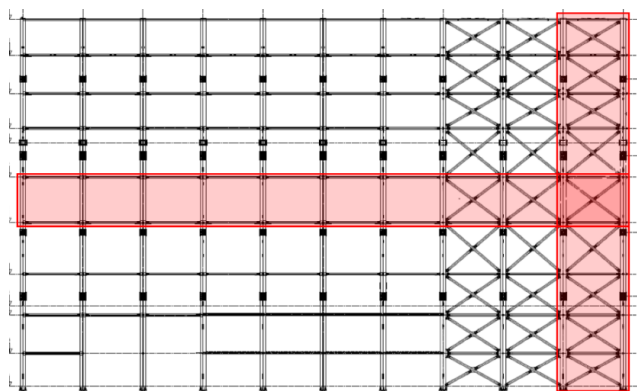


Figura 3. Alzado longitudinal esquemático de la estructura principal.

2.1.2. Riesgos de incendio durante la fase nuclear de operaciones

El diseño basado en prestaciones incluye, en la primera fase de su desarrollo, el análisis de todos los componentes, instalaciones y usos que tendrá el edificio evaluado. Dicho análisis comporta la determinación de unos riesgos de incendio, cada uno de los cuales tendrá una relevancia específica. Esto sirve para determinar cuáles son los escenarios más críticos que deben ser analizados para garantizar que se cumplen los criterios establecidos como punto de partida, en este caso la integridad de la estructura principal en caso de incendio.

Se recoge en la Tabla 1 aquellos riesgos de incendio más representativos que se derivan del análisis del funcionamiento del edificio durante la fase nuclear de operaciones.

Definición	Consideración riesgo de incendio	Escenario	Potencia liberada R.H.R.
Cabinas eléctricas	Sí	1	1,200kW/m ²
Unidades HVAC	Sí	2	1,000 kW/m ²
Bandejas cableado XPLE	No	-	-
Líneas de transmisión	No	-	-
Cajas de conexión eléctricas	Sí	3	1,000 kW/m ²
Puentes grúa secundarios 50T	Sí	4	1,600 kW/m ²
Almacenes Planta Baja	Sí	5	1,000 kW/m ²

Tabla 1. Resultados del análisis de riesgos de incendio.

Del análisis de los riesgos de incendio se determina que son cinco los escenarios más desfavorables que deben ser evaluados detalladamente para conocer cuál es el comportamiento del incendio en estos casos, y cuál es la respuesta estructural que de estos fuegos se deriva.

Uno de los aspectos más relevantes del análisis de riesgos efectuado es la complejidad relativa al conocimiento detallado de cuáles serán todas las operaciones que se podrán llevar a cabo en ITER, debido a que no existe ninguna otra instalación similar actualmente y, muy probablemente, los usos se irán adecuando a las necesidades que surjan durante los ensayos experimentales.

Se han podido establecer muy pocos condicionantes de partida en el diseño del edificio frente a la acción del fuego. Uno de ellos ha sido que los grandes puentes grúa capaces de mover cargas de hasta 1,500T no estarán operativos durante la fase nuclear, y que el aceite que contienen los motores del polipasto será retirado para evitar cualquier riesgo de incendio.

El edificio, como cualquier instalación nuclear, tiene unos requerimientos estrictos en el material que conforma el cableado eléctrico, lo que ha favorecido el reducir el riesgo de incendio. El recubrimiento aislante de aquellos cableados más significativos se diseña mediante polietileno reticulado (XLPE), lo que reduce en gran medida la energía aportada en un posible incendio [7].

Otros riesgos de incendio han tenido que ser determinados a partir de unos principios generales de funcionamiento, pero sin estar definida actualmente cual será la función de un espacio determinado. Éste ha sido el caso de los almacenes dispuestos en la planta baja. Ha sido preciso establecer unos límites conservadores en cuanto al material que se puede llegar a acumular en dichos espacios. Como orden de magnitud se han evaluado las consecuencias de almacenar materiales combustibles sólidos hasta 2m de altura, con una densidad de carga de fuego de 4,500MJ/m² [8].

3. Simulaciones computacionales de dinámica de fluidos

Una vez realizado el análisis de los riesgos de incendio que pueden producirse en el edificio y caracterizados cada uno de los incendios en base a diversos parámetros de cálculo, como por ejemplo la velocidad de crecimiento del incendio, la máxima potencia liberada, la energía aportada por el combustible, etc., se procede a desarrollar simulaciones numéricas de los incendios definidos a partir de modelos que sean capaces de caracterizar la dinámica del flujo y los procesos de combustión durante el desarrollo de los diversos incendios establecidos [9].

Estas simulaciones computacionales deben ser también capaces de caracterizar los complejos fenómenos turbulentos que se producen durante el calentamiento y el movimiento de los gases en un espacio cerrado, considerando que el gas es un fluido compresible.

Para caracterizar el comportamiento del fluido, considerado como un medio continuo, se establecen las siguientes ecuaciones de gobierno: Conservación de la Masa, Conservación de la Cantidad de Movimiento y Conservación de la Energía. Además, es necesario incluir las tensiones viscosas del fluido en las ecuaciones generales de gobierno. Incluyendo el Tensor de Tensiones viscosas en las ecuaciones de Cantidad de Movimiento y reordenándolas convenientemente se obtienen las ecuaciones en derivadas parciales que definen el movimiento de cualquier fluido, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes.

Para resolver dichas ecuaciones en su forma específica para flujos turbulentos compresibles a baja velocidad y caracterizar los procesos de combustión en los diferentes dominios considerados se recurre al programa de simulación *Fire Dynamics Simulator*, desarrollado en el *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Las simulaciones basadas en la dinámica de fluidos y los procesos de combustión requieren unas elevadas capacidades de cálculo computacional. Para la resolución numérica de las diferentes simulaciones se ha recurrido al cálculo en paralelo de altas prestaciones (HPC), mediante el clúster de cálculo de altas prestaciones de BAC, con sistema operativo Linux, procesadores Xeon tipo E5 y 4Gb de memoria RAM, tipo DDR3, por cada procesador. El número de procesadores utilizados varía en función de las necesidades específicas de cada simulación, pero está

comprendida entre un mínimo de 12 procesadores y un máximo de 112. Esta capacidad de simulación ha permitido cumplir con los plazos de entrega solicitados por el cliente en cada fase del diseño del proyecto.

Las simulaciones computacionales han permitido determinar con precisión cuáles serán las distribuciones de temperatura y gases calientes en función del escenario analizado.

Tal y como se recoge en la Tabla 1, uno de los escenarios evaluados es el posible incendio en una de las máquinas del sistema HVAC. En caso de producirse un incendio en estas máquinas, la temperatura máxima en la cubierta del edificio no superaría los 100°C (Figura 4).

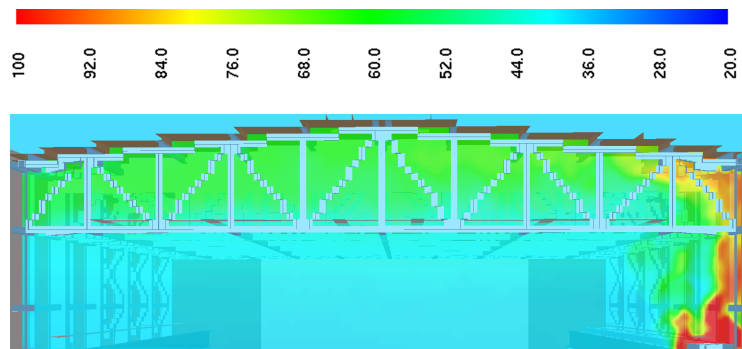


Figura 4. Distribución térmica bajo la cubierta.

Sin embargo, en caso de producirse un incendio en los almacenes situados en la planta baja las temperaturas que se alcanzarían serían significativamente más altas (Figura 5). Además, en este escenario el alcance de la llama en altura sería mucho más elevado, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.

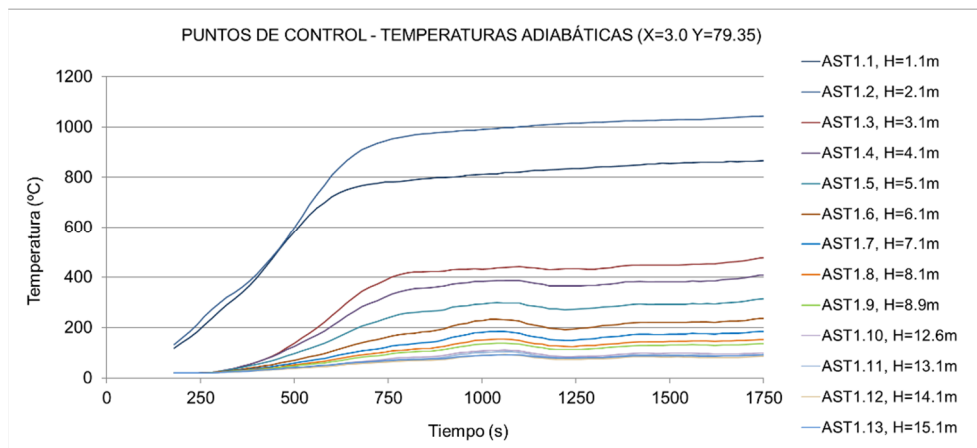


Figura 5. Leyes Temperatura-tiempo en el ámbito de los almacenes.

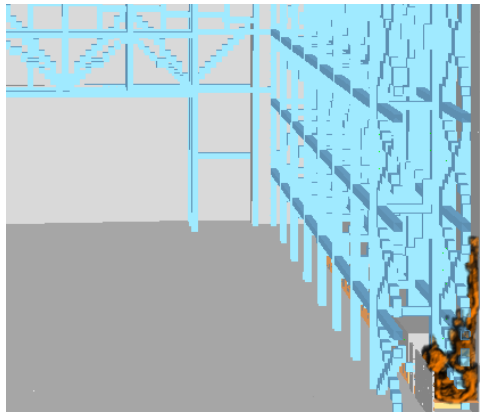


Figura 6. Altura de la llama en caso de incendio en los almacenes.

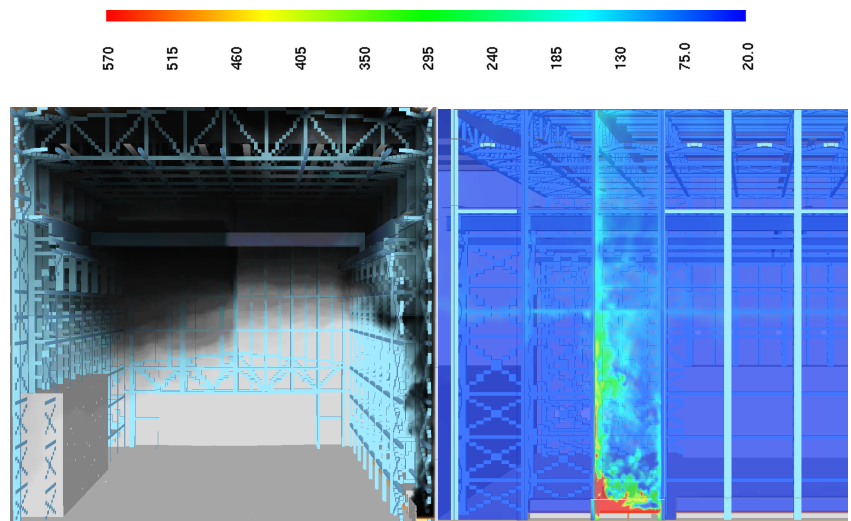


Figura 7. Distribución del humo y temperaturas máximas.

De manera complementaria se analiza la transmisión térmica que se produce en las uniones más representativas entre la estructura principal y el sistema de arriostramiento. Teniendo en cuenta que en el edificio se plantean zonas protegidas y zonas no protegidas, es necesario evaluar cuál es la transmisión térmica que se produce desde las zonas no protegidas, y que alcance longitudinal tiene dicha transmisión. Para ello se recurre a simulaciones computacionales de elementos finitos sólidos (Figura 8), realizadas en función del tiempo, mediante el programa Ansys Mechanical v.16.

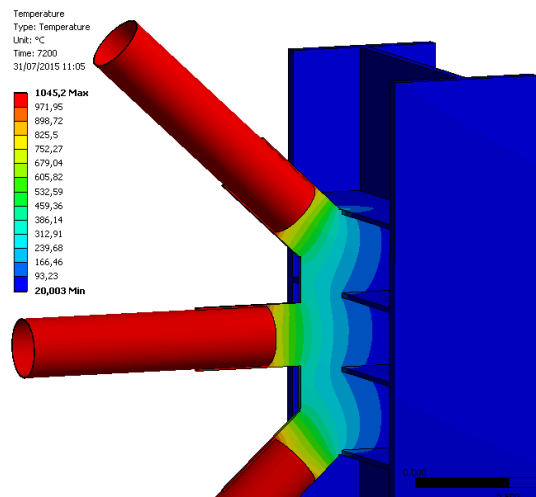


Figura 8. Incremento térmico en un nudo estructural sometido a la curva normalizada.

4. Análisis estructural y definición de ámbitos a proteger frente la acción del fuego

Una vez determinadas las acciones térmicas sobre la estructura se ha procedido a realizar diversos modelos estructurales térmico-mecánicos [4,5], con el objetivo de valorar cuantitativamente cual es la respuesta del entramado resistente en caso de incendio accidental.

Dada la bondad de resultados obtenidos, en lo que a las temperaturas de los gases calientes acumulados en la cubierta se refiere, se ha optado por realizar un modelo elástico lineal en primer orden. Esto es debido a que las temperaturas alcanzadas en los gases calientes acumulados en la cubierta no han superado los 100°C. Estos valores térmicos no afectan en ningún caso a las propiedades mecánicas del material. Tampoco ha sido preciso tener en cuenta no linealidades geométricas. Aquellos modelos en los que se ha considerado un incremento térmico uniforme de 100°C en las cerchas de cubierta han servido para dictaminar si la elevada rigidez a flexión de los pilares compuestos puede ocasionar esfuerzos térmicos internos de segundo orden, derivados de la coacción a la dilatación lineal de la cercha.

El único ámbito significativo que finalmente se protege frente a la acción del fuego es la zona coincidente con los almacenes situados en planta baja, allí donde el fuego afecta directamente a los elementos estructurales. En esta zona, y con el objetivo de facilitar el montaje de la fachada prefabricada enrasada con los pilares, se procede finalmente a encapsular la zona de almacenes. Tal y como se puede ver en la Figura 9, la zona a proteger en el pilar interior alcanza los 9m de altura, debido a la elevada potencia generada por el incendio y el alcance de la llama que se deriva de considerar las puertas de los encapsulamientos abiertas durante el incendio.

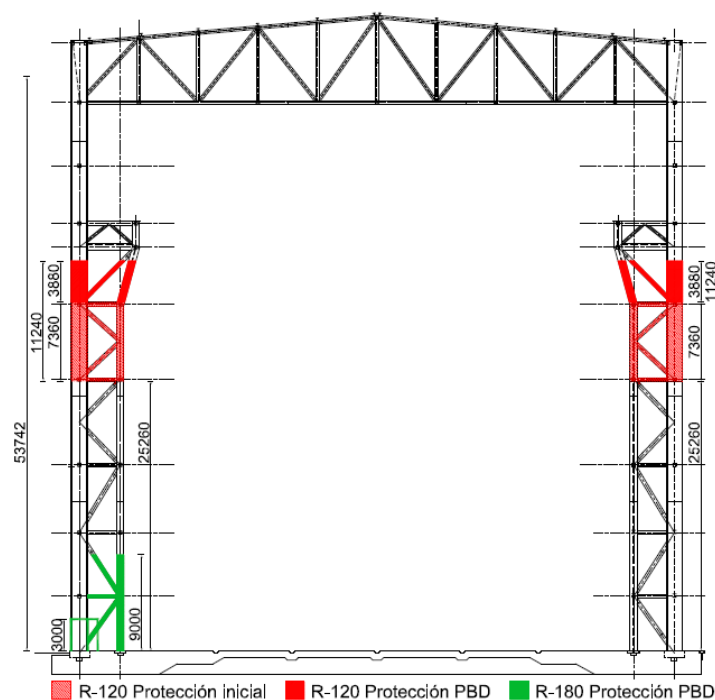


Figura 9. Distribución protección frente al fuego en la estructura según PBD.

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta los riesgos de incendio que existirán en el edificio durante la fase nuclear de operaciones, y habiendo simulado computacionalmente el comportamiento de cada uno de los incendios asociados a estos riesgos, las zonas que sistemáticamente se han protegido frente a la acción del fuego han quedado limitadas a unos ámbitos muy acotados.

En términos generales, las cerchas de cubierta no se protegen frente a la acción del fuego. Los pilares compuestos se han protegido en unos ámbitos muy localizados. En primer lugar, se protege un área a media altura, coincidiendo con la zona a proteger según los criterios de partida del estudio para evitar el colapso hacia el Tokamak. Esta protección coincide con la que finalmente determina el estudio prestacional debido al incendio de las máquinas de HVAC. En segundo lugar, también se protege en planta baja, coincidiendo con los almacenes. Es importante destacar que la zona de almacenes requiere una protección superior a la establecida según los métodos prescriptivos, siendo necesario recurrir a una protección de 3 horas.

El ahorro total se puede establecer en los siguientes términos:

Superficie total de estructura principal: 42,000m²

Superficie protegida: 13,100m²

Esto implica que la superficie protegida corresponde a un 31% de la superficie total prevista inicialmente según los métodos prescriptivos.

Agradecimientos

Se quiere agradecer el trabajo realizado por todo el equipo de BAC Engineering Consultancy Group que ha colaborado en el desarrollo de este proyecto, especialmente al Dr. Agustín Obiol Sánchez por sus valiosas aportaciones. También se quiere agradecer al equipo de ferrovial agroman la colaboración en todas las fases del proyecto para la consecución del mismo. Se agradece a Engage e ITER Organization su colaboración, facilitando todos los datos que han sido necesarios para llevar a cabo el estudio prestacional.

Referencias

- [1] EPRI/USNRC-RES, "Nuclear Power Plant. Fire modelling analysis guidelines" (NPP FIRE MAG – NUREG 1934 EPRI 1023259)
- [2] USNRC, "Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Final Report" (NUREG-1805)
- [3] EPRI/USNRC-RES, "Fire PRA methodology for nuclear power facilities" (NUREG/CR-6850 EPRI 1011989), Volume 2: Detailed Methodology
- [4] NF EN 1991 Actions on Structures: Part 1-2 General actions – Actions on structures exposed to fire
- [5] NF EN 1993 Design of Steel structures: Part 1-2 General rules – Structural fire design
- [6] Arrête du 22 mars 2004 relatif à la resistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages
- [7] USNRC, "Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire. Phase 1: Horizontal Trays (CHRISTIFIRE)" (NUREG/CR-7010), Vol. 1
- [8] NFPA, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition.
- [9] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, 2009.