

DISEÑO DE COLUMNAS BAJO FUEGO LOCALIZADO





SCI (The Steel Construction Institute) is the leading, independent provider of technical expertise and disseminator of best practice to the steel construction sector. We work in partnership with clients, members and industry peers to help build businesses and provide competitive advantage through the commercial application of our knowledge. We are committed to offering and promoting sustainable and environmentally responsible solutions.

Our service spans the following areas:

Membership

Individual & corporate membership

Advice

Members advisory service

Information

Publications

Education

Events & training

Consultancy

Development

Product development

Engineering support

Sustainability

Assessment

SCI Assessment

Specification

Websites

Engineering software

© 2018 SCI. All rights reserved.

Publication Number: **SCI P423**

Published by:

SCI, Silwood Park, Ascot,
Berkshire. SL5 7QN UK

T: +44 (0)1344 636525

F: +44 (0)1344 636570

E: reception@steel-sci.com

www.steel-sci.com

To report any errors, contact:

publications@steel-sci.com

Front cover photo:

A localised fire test carried out at the University of Ulster.

Apart from any fair dealing for the purposes of research or private study or criticism or review, as permitted under the Copyright Designs and Patents Act, 1988, this publication may not be reproduced, stored or transmitted, in any form or by any means, without the prior permission in writing of the publishers, or in the case of reprographic reproduction only in accordance with the terms of the licences issued by the UK Copyright Licensing Agency, or in accordance with the terms of licences issued by the appropriate Reproduction Rights Organisation outside the UK. Enquiries concerning reproduction outside the terms stated here should be sent to the publishers, SCI.

Although care has been taken to ensure, to the best of our knowledge, that all data and information contained herein are accurate to the extent that they relate to either matters of fact or accepted practice or matters of opinion at the time of publication, SCI, the authors and the reviewers assume no responsibility for any errors in or misinterpretations of such data and/or information or any loss or damage arising from or related to their use.

Publications supplied to the members of the Institute at a discount are not for resale by them.

British Library Cataloguing-in-Publication Data.
A catalogue record for this book is available from the British Library.

Créditos de las fotografías:

Salvo mención expresa, las fotografías han sido proporcionadas por los miembros del proyecto LOCAFI.

Esta guía de diseño ha sido traducida al castellano por Manuel L. Romero y Ana Espinós.

PREFACIO

Esta publicación ha sido preparada en el marco del Proyecto de la Unión Europea RFCS (Research Fund for Coal and Steel) ‘*Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localised fire – Valorisation (LOCAFI-plus)*’ (contrato número 754072).

Las instituciones que ha participado en el proyecto LOCAFI-plus son:

Arcelormittal Belval & Differdange SA Luxemburgo, Coordinador	Tallinna Tehnikaulikool Estonia
Centre Technique Industriel de la Construction Métallique Francia	Univerza V Ljubljani Eslovenia
Universitatea Politehnica Timisoara Rumania	Instytut Techniki Budowlanej Polonia
Universite de Liège Bélgica	Universitat Politècnica de València España
University Of Ulster Reino Unido	Technicka Univerzita V Kosiciach Eslovaquia
Universita Degli Studi Di Trento Italia	Staalinfocentrum – Infosteel Bélgica
Ceske Vysoke Uceni Technicke V Praze República Checa	Miskolci Egyetem Hungria
Stichting Bouwen met Staal Holanda	Tampere University of Technology Finlandia
Universidade de Aveiro Portugal	The Steel Construction Institute Reino Unido
Bauforumstahl ev Alemania	RISE Swedish Research Institute Suecia

Las siguientes personas han realizado una contribución significativa a la preparación de esta publicación:

- Phil Francis, SCI
- Nancy Baddoo, SCI
- Francois Hanus, ArcelorMittal
- Christophe Thauvoye, CTICM

Los mapas de contorno han sido desarrollados por CTICM.

Los autores agradecen la financiación recibida desde el Research Fund for Coal and Steel.

Contenidos

	Nº de página
PREFACIO	ii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Alcance de esta guía de diseño	1
1.2 Los Eurocódigos	1
1.3 Regulaciones nacionales sobre diseño basado en prestaciones en ingeniería del fuego	2
2 INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DEL FUEGO	3
2.1 Diseño frente a colapso y protección frente al fuego	3
2.2 Diseño según los Eurocódigos	4
3 FUEGOS LOCALIZADOS	8
3.1 Trabajo existente e implementación en el Eurocódigo	8
3.2 Ensayos y calibración	9
4 NUEVO MODELO PARA LA CARGA DE FUEGO EN COLUMNAS BAJO FUEGO LOCALIZADO	17
4.1 Principios y campo de aplicación	17
4.2 Herramientas de cálculo para modelar flujos de calor en fuegos localizados	19
4.3 Determinación de la temperatura de un segmento de la columna de acero	25
5 CÁLCULO DE LA COLUMNA	29
5.1 Comprobaciones	29
5.2 Carga	29
5.3 Resistencia	30
5.4 Determinación de la resistencia mediante análisis por elementos finitos	33
6 REFERENCIAS	34
Anexo A MODELO PARA CALCULAR LA CARGA DE FUEGO EN COLUMNAS SOMETIDAS A FUEGOS LOCALIZADOS	35
A.1 Introducción	35
A.2 Columnas situadas fuera del área del fuego	36
A.3 Columnas situadas dentro del área del fuego	45
A.4 Flujo de calor total recibido por un segmento de la columna	46
Anexo B APLICACIÓN A UNA COLUMNA FUERA DEL ÁREA DEL FUEGO	47
Anexo C MAPAS DE CONTORNO	56
Anexo D EJEMPLOS DE DISEÑO	81
D.1 Edificio industrial	81
D.2 Edificio de oficinas	84
D.3 Parking abierto	92

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Alcance de esta guía de diseño

Esta guía de diseño presenta un método para determinar la temperatura de una columna bajo la acción de un fuego localizado. El enfoque de la misma está en línea con los Eurocódigos. Se proporcionan además recomendaciones de diseño sobre cómo determinar la resistencia de una columna de acero expuesta a temperatura elevada. El empleo de este enfoque prestacional para evaluar la resistencia estructural frente al fuego normalmente redundará en una reducción del coste de la protección pasiva a utilizar, en comparación con la requerida por un enfoque prescriptivo.

La presente guía incluye los siguientes contenidos:

- Una introducción general a la ingeniería del fuego, incluyendo una sección de escenarios de modelado y técnicas de cálculo.
- Recomendaciones específicas sobre diseño con fuego localizado, incluyendo un resumen del trabajo de investigación realizado en el marco del Proyecto Europeo LOCAFI.
- Un nuevo modelo de cálculo para fuego localizado.
- Una descripción de las herramientas de diseño disponibles para modelar fuegos localizados, la cual comprende desde análisis simplificados empleando mapas de contorno, hasta modelos de elementos finitos sofisticados.
- Un resumen del modelo de cálculo del Eurocódigo 3 para evaluar la capacidad portante de pilares de acero en situación de incendio, el cual puede ser empleado con el modelo de análisis de temperatura para obtener la resistencia de la columna.
- Ejemplos de diseño, demostrando el uso del modelo en escenarios de diseño realistas.

1.2 Los Eurocódigos

Los Eurocódigos son una serie de 10 normas europeas, EN 1990 - EN 1999, que proporcionan un enfoque común al cálculo de edificios y otras obras de ingeniería civil y productos de construcción. A la hora de considerar el cálculo resistente frente al fuego de un elemento estructural de acero o mixto acero-hormigón, los siguientes Eurocódigos son de aplicación:

- EN 1990 Eurocódigo 0. Bases de cálculo de estructuras ^[1]
- EN 1991-1-2 Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego ^[2]
- EN 1993-1-2 Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero. Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego ^[3]
- EN 1994-1-2 Eurocódigo 4. Proyecto de estructuras mixtas. Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego ^[4]

Cada uno de estos Eurocódigos viene acompañado por un Anejo Nacional, el cual, donde proceda:

- Especificará el valor de un factor (denominado ‘*Nationally Determined Parameter*’),

- Especificará qué método de cálculo emplear,
- Indicará si se debe utilizar un Anejo informativo.

Adicionalmente, el Anejo Nacional proporcionará referencias a publicaciones que contengan información complementaria no contradictoria (*'non-contradictory complimentary information'*, NCCI) que pueda servir de ayuda al calculista. Las recomendaciones proporcionadas en un Anejo Nacional son de aplicación a todas aquellas estructuras que se vayan a construir en dicho país. Los Anejos Nacionales pueden diferir entre distintos países dentro de Europa.

1.3 Regulaciones nacionales sobre diseño basado en prestaciones en ingeniería del fuego

La comprensión de las ventajas y limitaciones de la ingeniería prestacional contra incendios ha mejorado en los últimos años. Sin embargo, existe una variación notable a lo largo de Europa en cuanto a las normas de control nacionales en construcción relativas a la seguridad contra incendios. Por esta razón, resulta esencial que el calculista sea conocedor de cuál es la normativa de aplicación en el país donde se va a situar la estructura, y esté coordinado con la autoridad competente que se encargará de la verificación y aprobación en la fase oportuna del proyecto.

Para ayudar en esta labor, se proporciona en la siguiente página web una guía sobre los pasos requeridos para obtener la autorización para el empleo de métodos de diseño en fuego basados en prestaciones en los diferentes países europeos: <https://research.bauforumstahl.de/>.

Link directo a los documentos del proyecto LOCAFIplus: <https://research.bauforumstahl.de/es/fire-safety-3/diseno-de-columnas-bajo-fuego-localizado/>

2 INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DEL FUEGO

El fuego representa una amenaza severa para la vida humana. Es esencial que los edificios se diseñen y construyan de manera que, en situación de incendio, su estabilidad se mantenga durante un período lo suficientemente largo que permita tanto la evacuación de los ocupantes como el desencadenamiento de las medidas de contención. La Ingeniería de Protección Contra Incendios (PCI) o más comúnmente ingeniería del fuego, consiste en la aplicación de los principios científicos al diseño de estructuras para garantizar la seguridad de los ocupantes en todos los escenarios posibles.

La ingeniería del fuego englobe un amplio espectro de cuestiones, entre las cuales se encuentran:

- Minimizar el riesgo del inicio del fuego en primer lugar,
- Contener el fuego en su punto de inicio, es decir, detener la propagación del fuego a otras partes del edificio u otras estructuras,
- Proporcionar medidas de lucha contra incendios, por ejemplo rociadores,
- Proporcionar protección frente al fuego a la estructura, de manera que se evite su colapso,
- Comprender la reacción humana al fuego, dígase respuesta a alarmas, capacidad de encontrar rutas de evacuación seguras, etc.

La provisión de medidas para minimizar el impacto del fuego puede suponer una importante fracción del coste de la estructura. La sobre-regulación de las medidas de protección frente al fuego puede dar lugar a estructuras antieconómicas. Se requiere por tanto una solución de compromiso que proporcione una protección adecuada frente a los escenarios de diseño en fuego al mínimo coste para el cliente.

Para mayor información sobre ingeniería del fuego, se recomiendan las siguientes publicaciones ^[5,6,7,8].

Esta guía de diseño proporciona un método para estimar la evolución de la temperatura en una columna sometida a un fuego localizado. Una vez se conoce la temperatura, es posible calcular su resistencia. Según se explica en la Sección 2.2, este enfoque prestacional de ingeniería del fuego puede redundar en una reducción significativa de la protección necesaria frente al fuego y, en consecuencia, de su coste, en comparación con el requerido desde un punto de vista prescriptivo.

2.1 Diseño frente a colapso y protección frente al fuego

Evitar el colapso es uno de los objetivos fundamentales en el proceso de ingeniería del fuego. El colapso representa una pérdida repentina y catastrófica de la estabilidad de la estructura y normalmente lleva asociada la muerte de los ocupantes presentes en el edificio cuando éste sucede, independientemente de si se trata de usuarios del propio edificio o personal de lucha contra incendios.

El colapso de un edificio se evita por lo general protegiendo los elementos estructurales. La protección contra incendios adopta normalmente dos formas, no-reactiva (paneles y espráis) y reactiva (pinturas intumescentes).

La protección mediante paneles proporciona aislamiento al fuego a través del uso de placas con partículas altamente aislantes de base cementosa de alta densidad y baja conductividad térmica. Las partículas cementosas también pueden ser aplicadas mediante espray.

Las pinturas intumescentes son recubrimientos inertes a temperaturas bajas pero que proporcionan aislamiento al fuego como resultado de una reacción química compleja a temperaturas típicamente alrededor de 200-250°C. En este rango de temperaturas, las propiedades mecánicas del acero no se ven afectadas. Como resultado de esta reacción, las pinturas intumescentes se hinchan, proporcionando de esta manera una capa expandida de carbonilla de baja conductividad.

El efecto aislante de un panel de revestimiento, proyección o pintura tiende a ser proporcional al espesor del material aplicado. Por tanto, proporcionar más protección de la requerida queda siempre del lado de la seguridad. Sin embargo, esto incrementa el coste. En ocasiones resulta más económico especificar un elemento estructural de mayores dimensiones no protegido que un elemento de dimensiones menores protegido, pues el coste de la protección se elimina en el primer caso.

En gran cantidad de ocasiones se puede demostrar que la estructura es capaz de mantenerse funcional sin la utilización de protección frente al fuego.

La selección de los espesores del material de protección requiere la consideración de los siguientes factores:

- (a) La severidad del fuego, y el aumento prematuro de la temperatura en el elemento estructural,
- (b) Las propiedades del material de protección,
- (c) La temperatura a la que se permite llegar al elemento protegido antes de que ocurra su colapso, denominada 'temperatura crítica'.

En los Eurocódigos se proporcionan reglas de diseño para determinar la resistencia de la estructura en situación de incendio (Sección 5).

2.2 Diseño según los Eurocódigos

Un diseño completo en situación de incendio requiere del uso combinado de ciertos Eurocódigos. El EN 1991-1-2 en su apartado 2.1 establece cuatro pasos principales en un análisis de cálculo estructural en situación de incendio:

- Selección de los escenarios de fuego cálculo oportunos,
- Determinación de los fuegos de cálculo correspondientes,
- Cálculo de la evolución de la temperatura en los elementos estructurales,
- Cálculo del comportamiento mecánico de la estructura expuesta al fuego, empleando el EN 1993-1-2 para estructuras de acero.

2.2.1 Escenarios de fuego de cálculo

El EN 1991-1-2, en su apartado 2.2 describe el proceso para seleccionar un escenario de fuego de cálculo.

Un enfoque prescriptivo en ingeniería del fuego implica a menudo el uso de una curva normalizada temperatura-tiempo. Esta será una de las tres curvas nominales temperatura-tiempo proporcionadas por el Eurocódigo, que modelan la evolución de la temperatura en un fuego totalmente desarrollado dentro del recinto (Sección 2.2.2 de este documento).

La mayoría de estructuras en edificios de oficinas son de tamaño y forma razonablemente estándar y en ellas un enfoque prescriptivo se considera suficiente. El espesor del material de protección frente al fuego se determina asumiendo la inmersión total en el fuego que conlleva la curva normalizada temperatura-tiempo, y depende de las dimensiones de la sección y del requerimiento de resistencia al fuego.

Sin embargo, para ciertos tipos de estructuras como en aeropuertos y otros edificios con grandes luces, la aplicación de la curva estándar temperatura-tiempo no siempre es apropiada; un diseño basado en las propiedades del fuego real dará lugar a diseños más precisos y normalmente más económicos. Esto se conoce como enfoque basado en prestaciones y requiere la comprensión tanto del material que puede originar el incendio como del tamaño y características de la ventilación del compartimento donde se desarrolla el fuego. La selección de un escenario de fuego de cálculo apropiado y de las técnicas de modelado es importante de cara a asegurar la validez del diseño.

2.2.2 Fuego de sector

Un fuego totalmente desarrollado de sector sucede cuando todo el material combustible del recinto entra en combustión simultáneamente, lo que ocurre en el punto denominado '*flashover*'. Se puede suponer de manera razonable que la temperatura en el recinto es uniforme a lo largo del mismo. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de un fuego de sector.



Fuente: Czech Technical University (Praga)

Figura 2.1 Fuego de sector

2.2.2.1 Curva normalizada tiempo-temperatura

La variación de la temperatura en el recinto a lo largo del tiempo se puede describir mediante la curva normalizada tiempo-temperatura dada en el EN 1991-1-2. Esta curva es únicamente una curva de referencia, la cual no pretende representar ningún escenario de fuego específico. En la mayoría de las situaciones, ésta resulta ser excesivamente conservadora en comparación con los datos registrados. Esta curva no considera la reducción de la temperatura conforme se consume el combustible.

La curva normalizada tiempo-temperatura está definida por:

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

Donde:

θ_g es la temperatura del gas en el sector de incendio

t es el tiempo, medido en minutos

La Figura 2.2 muestra la evolución de la temperatura frente al tiempo definida por la curva normalizada.

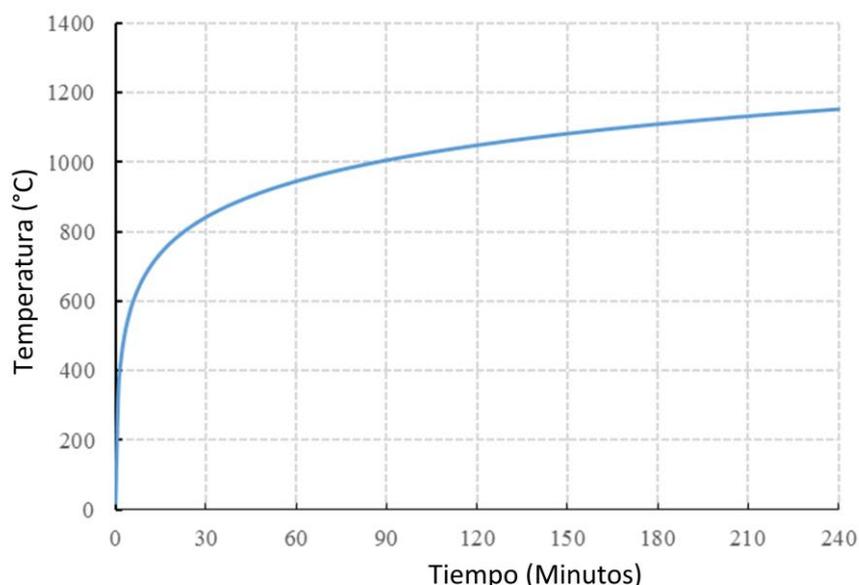


Figura 2.2 Curva normalizada tiempo-temperatura

2.2.2.2 Otros enfoques de diseño en fuego

El empleo de la curva normalizada tiempo-temperatura suele dar lugar a un requerimiento de protección que, para la mayoría de estructuras convencionales, resulta aceptable desde el punto de vista económico. Sin embargo, algunos diseños pueden pretender garantizar un análisis más detallado y realista, el cual resulte en temperaturas más reducidas.

La severidad de un fuego de sector viene determinada por varios factores, entre ellos:

- Tipo de material combustible, densidad y distribución,
- Tamaño y geometría del recinto,
- Condiciones de ventilación y de circulación del aire.

La curva temperatura-tiempo para el sector puede determinarse de manera alternativa por medio de modelos de fuego natural, como las curvas paramétricas tiempo-temperatura (dadas en el Anexo A del EN 1991-1-2), modelo de zonas (dado en el Anexo D del EN 1991-1-2) o un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) (véase 2.2.4 para más detalles). Estos modelos permiten calcular la temperatura del gas en el sector de incendio en función de su geometría, condiciones de ventilación, propiedades térmicas de los cerramientos, tasa de liberación de calor y densidad de carga de fuego. Nótese que el empleo del Anexo A del EN 1991-1-2 no está permitido por los Anejos Nacionales de ciertos países.

2.2.3 Fuegos localizados

Un escenario de fuego de sector considera que la temperatura del recinto crece uniformemente. Para sectores relativamente pequeños y donde la carga de fuego se distribuya uniformemente, esta suposición es habitualmente bastante realista. Sin embargo, conforme el tamaño del recinto aumenta o en el caso de que la carga de fuego esté concentrada en una zona de superficie reducida, esta consideración tiende a volverse cada vez más conservadora. En estos casos, un enfoque que tenga en cuenta la variación de la temperatura con la posición a lo largo del sector permite obtener resultados menos conservadores, si bien el análisis requerido para obtener la distribución de temperaturas es considerablemente más complejo.

El análisis empleando modelos de fuego localizado es el objeto de la Sección 3.

2.2.4 Modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD)

Un fuego presenta una mezcla compleja de fenómenos físicos que implica que no siempre se puedan emplear enfoques simplificados para reproducir adecuadamente las temperaturas asociadas al escenario de fuego de cálculo. En dichos casos, los modelos sofisticados basados en dinámica de fluidos computacional (CFD) son capaces de proporcionar la mejor representación posible del fuego para el calculista. Los modelos CFD se pueden emplear para modelar cualquier escenario de fuego imaginable, incluyendo fuegos totalmente desarrollados, fuegos localizados, fuegos en el exterior de edificios, etc.

La reproducción de los fenómenos físicos requeridos para modelar adecuadamente un fuego es una tarea extremadamente complicada. En particular, no es posible calcular las turbulencias con total precisión a ninguna escala; en su lugar, se emplean generalmente ciertos modelos semi-empíricos para aproximar los efectos globales. El rango de modelos potenciales existentes es amplio, por lo que se requiere una selección cuidadosa del modelo más apropiado para la situación a analizar. Por todas estas razones, los modelos CFD son empleados únicamente por especialistas.

En la publicación: “*Guide to the advanced fire safety engineering of structures*”^[9] se puede encontrar una introducción útil a las técnicas de modelado de incendios con CFD.

3 FUEGOS LOCALIZADOS

Tal y como se expuso en la Sección 2, las reglas prescriptivas para el diseño en fuego asumen típicamente un sector totalmente envuelto en llamas, con una temperatura uniforme a lo largo de todo el recinto. Esta suposición tiende a ser particularmente gravosa para sectores grandes. La ingeniería del fuego basada en prestaciones permite al usuario tener en cuenta el comportamiento real del fuego, que a menudo puede ser altamente localizado. En estos casos, resulta esencial la comprensión de cómo se comportan los fuegos localizados, y cómo afectan a otras zonas del sector de incendio.



Figura 3.1 Ensayo de laboratorio de una columna expuesta a un fuego localizado

3.1 Trabajo existente e implementación en el Eurocódigo

La ingeniería del fuego prestacional empleando fuegos localizados viene recogida en el Anexo C del EN 1991-1-2^[2]. Este Anexo proporciona un método para calcular la longitud de llama y las temperaturas del penacho en un fuego localizado. El método se basa en los trabajos de Heskestad^[10] y Hasemi^[11], que proporcionan una correlación entre el tamaño del fuego (definido por la tasa de liberación de calor y el diámetro) y otros parámetros, incluyendo la altura de la llama y la temperatura interna del fuego.

Los fuegos que impactan contra el techo tienden a propagarse en dirección radial. El modelo tiene esto en cuenta a la hora de calcular la distribución de temperatura en el recinto. La Figura 3.2 muestra ambas situaciones.

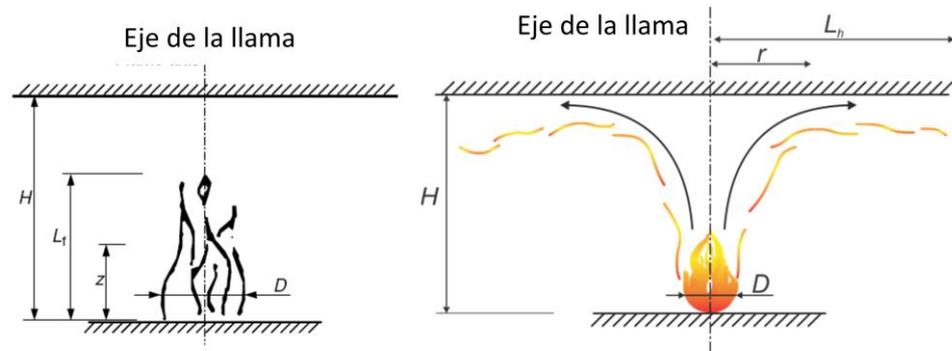


Figura 3.2 Parámetros necesarios para describir un fuego localizado (izquierda: la llama no impacta contra el techo, derecha: la llama impacta contra el techo)

El EN 1991-1-2 en su Anexo C no proporciona un método para evaluar la temperatura o el flujo de calor recibido por un elemento estructural situado a una determinada distancia de la fuente del fuego. Además, el método del Anexo C establece del lado de la seguridad la emisividad de la llama igual a 1.0, lo que tiende a proporcionar resultados excesivamente conservadores en comparación con ensayos. En el proyecto LOCAFI, financiado por el RFCS (*Research Fund for Coal and Steel*) de la Unión Europea, se llevó a cabo un trabajo para mejorar el método del Anexo C para fuegos localizados. Mediante una serie de ensayos, y el subsiguiente trabajo numérico y de análisis, se propusieron mejoras al método, apuntando a estas limitaciones. El modelo mejorado se introduce en la Sección 4 y se presenta en detalle en el Anexo A de este documento. La Sección 3.2 describe la campaña experimental llevada a cabo para calibrar y verificar este modelo.

3.2 Ensayos y calibración

Esta sección describe los ensayos que se llevaron a cabo para desarrollar un modelo térmico mejorado para fuegos localizados. Los detalles completos se pueden consultar en la documentación del Proyecto LOCAFI, referenciada en el texto.

3.2.1 Ensayos en la Universidad de Liège

El primer grupo de ensayos llevados a cabo como parte del proyecto LOCAFI fueron realizados en la Universidad de Liège. Se llevó a cabo un total de 24 ensayos (*'pool fires'*) en cubeta única. Los detalles completos de los ensayos se pueden encontrar en el Deliverable 6 del proyecto LOCAFI^[12].

Se emplearon dos tipos de combustible líquido, realizándose los ensayos de tal forma que se obtuviera la misma tasa de liberación de calor (HRR). Los líquidos empleados fueron N-Heptano y Diésel.

Los ensayos se realizaron situando la columna tanto en el centro como fuera de la cubeta de combustible. Esto no produjo un efecto significativo sobre el HRR.



Figura 3.3 Cubeta de ensayo de 2 m, donde se puede observar el sistema de alimentación de combustible (del Deliverable 15^[13] de LOCAFI)

El combustible líquido se vertió en cubetas de cinco diámetros diferentes, de 600 mm a 2200 mm. Cada diámetro se ensayó con N-Heptano y Diésel, en idénticas configuraciones. A diferencia de los ensayos descritos en 3.2.2, el combustible se suministraba a la cubeta a un ritmo constante, en lugar de comenzar el ensayo con el volumen completo de combustible en la cubeta. Este mecanismo de control permitió mantener constante el HRR alrededor de 500 kW/m².

El HRR de los ensayos de Liège se calculó empleando la Ecuación (3.1), donde la densidad de combustible (kg/m³) ρ es 680 (heptano) o 840 (diésel), y la entalpía de combustión (kJ/kg) ΔH_c es 44600 (heptano) o 43200 (diésel)^[20].

$$HRR = \chi q \rho \Delta H_c \quad (3.1)$$

La Tabla 3.1 muestra un resumen de los ensayos llevados a cabo.

Tabla 3.1 Resumen de los ensayos llevados a cabo en la Universidad de Liège

Ensayo Número	Diámetro (m)	Combustible	HRR medido (kW)
1	0.6	Diésel	145
2	0.6	Heptano	140
3	0.6	Diésel	121
4	0.6	Heptano	120
5	1.0	Diésel	397
6	1.0	Heptano	393
7	1.0	Diésel	373
8	1.0	Heptano	369
9	1.4	Diésel	769
10	1.4	Heptano	771
11	1.4	Diésel	750
12	1.4	Heptano	747
13	1.4	Diésel	769
14	1.4	Heptano	771
15	1.8	Diésel	1272
16	1.8	Heptano	1272
17	1.8	Diésel	1229
18	1.8	Heptano	1228
19	2.2	Diésel	19011
20	2.2	Heptano	1899
21	2.2	Diésel	1858
22	2.2	Heptano	1858
23	Madera		
24	Madera		

3.2.2 Ensayos en FireSERT (Universidad de Ulster)

Se llevaron a cabo un total de 52 ensayos en las instalaciones del FireSERT (Universidad de Ulster), englobando un gran rango de tamaños y posiciones del fuego. Los ensayos se dividieron en 2 series; ensayos sin techo (Tabla 3.2) y ensayos con techo (Tabla 3.3). Los detalles completos de los ensayos se pueden encontrar en el Deliverable 7 del proyecto LOCAFI^[14].

3.2.2.1 Ensayos sin techo

Dentro de la primera fase del trabajo se llevaron a cabo 31 ensayos (Tabla 3.2). La distancia entre la columna y el fuego se varió a fin de estudiar diferentes escenarios de cargas de fuego y posiciones del mismo. Las cargas se variaron en función del tipo de combustible (Diésel, Keroseno y pallets de madera), tamaño global del fuego (número y tamaño de las cubetas) y posición. Se emplearon además distintas columnas de acero, permitiendo medir así los efectos de la variación en la forma y tamaño del perfil de acero sobre las temperaturas y flujos medidos. Se midió también El HRR de diferentes combustibles para mejorar y extender el Anexo C del EN 1991-1-2.

Se observó una discrepancia entre los valores medidos de HRR y el HRR esperado para la combinación de tamaño del fuego y el combustible ensayado. Se aplicó una corrección a las medidas para los efectos del modelado numérico, según lo expuesto en el Deliverable 8-9 de LOCAFI^[16]. La Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 presentan tanto las mediciones originales como los valores corregidos.

Tabla 3.2 Resumen de los ensayos llevados a cabo en FireSERT, sin techo

Ensayo Número	Combustible	Diámetro y número de cubetas	HRR (kW)	
			Medido	Corregido
Columna O2 - O1	Keroseno	0.7 m	783	503
Columna O2 - O2	Keroseno	0.7 m	728	515
Columna O2 - O3	Diésel	0.7 m	640	468
Columna O2 - O4	Diésel	0.7 m	543	442
Columna O2 - O5	Diésel	0.7 m	485	388
Columna O2 - O6	Diésel	0.7 m	640	441
Columna O2 - O7	Keroseno	0.7 m	658	493
Columna O2 - O8	Keroseno	1.6 m	4378	3492
Columna O2 - O9	Keroseno	0.7 m × 4	3388	2665
Columna O2 - O10	Diésel	1.6 m	3617	2725
Columna O2 - O11	Diésel	0.7 m × 4	2601	2015
Columna O2 - O12	Keroseno	1.6 m	3713	2648
Columna O2 - O13	Diésel y Keroseno	0.7 m × 2	2899	2428
Columna O2 - O14	Madera	0.5 m cúbico	1944	1433
Columna I2 - I1	Keroseno	0.7 m	737	529
Columna I2 - I2	Keroseno	0.7 m	663	484
Columna I2 - I3	Keroseno	0.7 m	692	559
Columna I2 - I4	Keroseno	0.7 m	806	637
Columna I2 - I5	Diésel	0.7 m	688	578
Columna I2 - I6	Diésel	0.7 m	658	513
Columna I2 - I7	Diésel	0.7 m	547	466
Columna I2 - I8	Diésel	0.7 m	676	484
Columna I2 - I9	Keroseno	1.6 m	4762	3750
Columna I2 - I10	Keroseno	1.6 m	3894	3200
Columna I2 - I11	Keroseno	0.7 m × 3	2255	1873
Columna I2 - I12	Keroseno	0.7 m × 2	1439	1192
Columna I3 - I13	Keroseno	0.7 m	736	570
Columna I3 - I14	Keroseno	0.7 m	708	525
Columna I3 - I15	Keroseno	0.7 m	617	520
Columna I3 - I16	Keroseno	0.7 m × 2	1335	1114
Columna H2 - H1	Keroseno	0.7 m	641	438
Columna H2 - H2	Keroseno	0.7 m	610	514
Columna H2 - H3	Keroseno	0.7 m	628	458
Columna H2 - H4	Keroseno	0.7 m	630	484
Columna H2 - H5	Keroseno	0.7 m × 2	1425	1106
Columna H2 - H6	Keroseno	0.7 m × 3	2402	1771
Columna H2 - H7	Keroseno	1.6 m	3828	2955

La Figura 3.4 muestra dos de los ensayos. La fotografía de la izquierda muestra las cubetas empleadas para contener el combustible líquido, que restringen el diámetro del fuego.



Figura 3.4 Montaje del ensayo para fuego localizado en FireSERT (izquierda: cubetas para contener combustible líquido, derecha: pallets de madera)

3.2.2.2 Ensayos con techo

Dentro de la segunda fase del trabajo se ensayaron 21 casos adicionales. Igual que en la primera fase, se varió el tamaño y posición del fuego en el recinto. Esta serie de ensayos se resume en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resumen de los ensayos llevados a cabo en FireSERT, con techo

Ensayo Número	Combustible	Diámetro y número de cubetas	HRR (kW)	
			Medido	Corregido
Techo - O21	Keroseno	0.7 m	739	563
Techo - O22	Keroseno	0.7 m	759	575
Techo - O23	Keroseno	0.7 m	814	511
Techo - O24	Keroseno	0.7 m	763	607
Techo - O25	Keroseno	0.7 m	476	512
Techo - O26	Keroseno	1.6 m	3653	2885
Techo - O27	Diésel	0.7 m	515	496
Techo - O28	Diésel	0.7 m	397	468
Techo - O29	Diésel	0.7 m	633	490
Techo - O30	Diésel	0.7 m	614	472
Techo - O31	Keroseno	0.7 m × 2	1420	1074
Techo - O32	Diésel	0.7 m × 2	1185	952
Techo - O33	Madera	0.5 m cúbico	440	295
Techo - O34	Madera	0.5 m cúbico	400	273
Techo - O35	Madera	0.5 m cúbico × 2	702	666
Techo - O36	Madera	1 × 1 × 0.5 m	1410	1870
Techo - O37	Keroseno	0.7 m × 4	3215	2506
Techo - O38	Madera	1 × 1 × 0.5 m	1788	2253
Techo - O39	Diésel	1.6 m	-	-
Techo - O40	Keroseno	0.7 m	-	-
Techo - O41	Madera	1 × 1 × 0.5 m	-	-

La Figura 3.5 muestra una llama del caso ‘Techo - O38’ donde el impacto de ésta con el techo es claramente visible.



Figura 3.5 Llama impactando contra el techo

3.2.3 Modelo numérico

Para complementar los ensayos, se llevó a cabo un modelo numérico. El objetivo principal de este trabajo numérico fue extrapolar la base de datos experimental a situaciones fuera del alcance de los ensayos, incluyendo fuegos de mayor diámetro, cuyo ensayo resultaría de mayor riesgo.

Para llevar a cabo el modelo numérico, se empleó el programa Fire Dynamics Simulator (FDS)^[15], el cual simula la transmisión de calor desde un fuego en base a dinámica de fluidos computacional (CFD). La Figura 3.6 compara una fotografía de la llama real en uno de los ensayos con la predicha empleando el software FDS.

El fuego es un fenómeno dinámico y variable, el cual resulta extremadamente difícil de predecir computacionalmente. FDS requiere por tanto un gran número de parámetros de entrada, muchos de los cuales dependen de circunstancias particulares del ensayo. Entre los parámetros del modelo se incluyen la eficiencia de la combustión, la fracción de hollín, la fracción radiativa, el modelo de turbulencia, los parámetros de turbulencia y el número de ángulos de radiación. Los parámetros más relevantes se describen en las siguientes secciones.

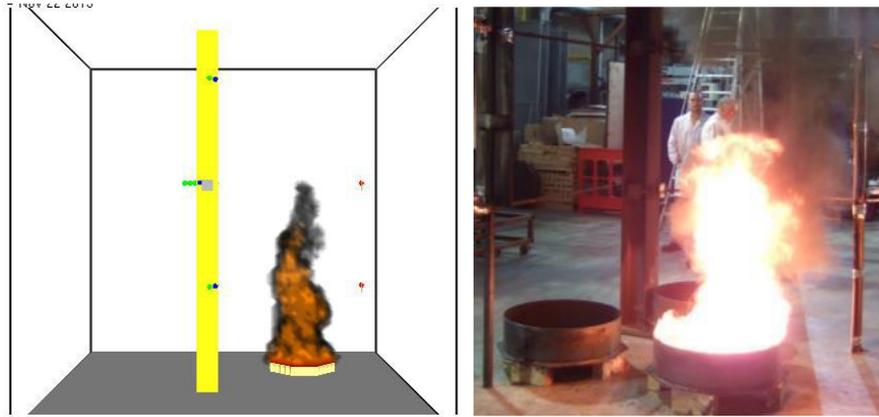


Figura 3.6 Comparación entre la forma de la llama predicha por FDS y una fotografía del ensayo, para la Columna I2 - I11 ^[16] ensayada en FireSERT

3.2.3.1 Modelo de turbulencia

La correcta reproducción del modelo de turbulencia (cambios aleatorios en la presión y velocidad del fluido) es una parte fundamentalmente importante en la mayoría de problemas CFD. En un fuego, la turbulencia da lugar a cambios en la altura y posición de la llama con el tiempo. La reproducción de los procesos físicos implicados en la turbulencia está fuera del alcance de cualquier modelo computacional a día de hoy. En su lugar, programas como FDS hacen uso de algoritmos de aproximación global, presentando cada uno de ellos diferentes ventajas e inconvenientes para cada situación, según las condiciones de contorno del problema. FDS 5 emplea el relativamente antiguo, pero generalmente aceptado, modelo ‘*Smagorinsky*’, mientras que FDS 6 permite la selección de unos cuantos modelos de turbulencia distintos, incluyendo los modelos ‘*Dynamic Smagorinsky*’, ‘*Vreman*’ y ‘*Deardoff*’^[17] (el cual viene seleccionado por defecto).

Se llevaron a cabo estudios paramétricos para investigar la variación en las temperaturas obtenida al emplear cada uno de los modelos. Los estudios también analizaron el efecto de variar los parámetros del modelo que gobiernan el comportamiento dentro de cada uno de los algoritmos. La conclusión final del estudio fue que el modelo ‘*Constant Smagorinsky*’ proporcionaba la mejor consistencia con los resultados experimentales, empleando un valor de 0.1 para la constante de Smagorinsky.

Aquellos calculistas que deseen emplear soluciones CFD deben de ser conscientes de que la selección del modelo de turbulencia puede afectar significativamente los resultados numéricos.

3.2.3.2 Fracción radiativa

La fracción radiativa representa la fracción de la energía liberada por el fuego en forma de radiación térmica, por contraposición a la liberada por convección. Tal y como se explica en la Sección 13.1.1 de la Guía de Usuario de FDS ^[15], la proporción real de radiación liberada es función de la temperatura y composición química de la llama, ninguna de las cuales puede ser calculada por el programa con suficiente precisión para dar un resultado acertado. En su lugar, el programa emplea un valor global calibrado.

Por defecto, FDS emplea un valor de 0.35, esto es, el 35% del calor es radiativo y el 65% convectivo. Se ensayaron también otros valores para la fracción radiativa, dando lugar a un balance diferente entre el calor radiativo y convectivo. El resultado más preciso se obtuvo empleando el valor por defecto.

3.2.3.3 Vientos cruzados

Las simulaciones numéricas se basan habitualmente en un sector totalmente en calma, lo que significa que el aire asciende verticalmente hacia arriba, y las llamas tienden a ser verticales. En condiciones reales, esta suposición raramente se cumple, causando el más sutil movimiento de aire la inclinación (*'tilting'*) de la llama. Muchos de los ensayos descritos en las Secciones 3.2.1 y 3.2.2 mostraron una inclinación visible; un ejemplo de ello se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Ensayo O36, mostrando la inclinación de la llama

Si bien no fue medida sistemáticamente en los ensayos, la inclinación de la llama resultaba claramente visible. Por tanto, la inclusión del viento en el modelo fue fundamental para alcanzar el suficiente grado de precisión en su calibración.

3.2.4 Resultados clave

Los ensayos de LOCAFI proporcionan una gran cantidad de datos de configuraciones no cubiertas actualmente por el Anexo C del EN 1991-1-2.

Los ensayos de la Universidad de Liège se centraron en configuraciones donde la columna está envuelta por las llamas. Se investigó la influencia de la presencia de la columna sobre la altura y temperatura de las llamas a diferentes niveles, de donde se demostró que la presencia de la columna produce una llama más alta. Sin embargo, la altura y temperatura de las llamas a lo largo del eje vertical predicha por el EN 1991-1-2 queda del lado de la seguridad con o sin la columna dentro del dominio de la llama (zona de combustión) y el penacho (zona de no-combustión).

Los ensayos de la Universidad de Ulster se centraron en configuraciones donde las columnas quedan situadas fuera del fuego. Estos ensayos demostraron que la altura y temperatura de las llamas a lo largo del eje vertical de la fuente del fuego predichas por el EN 1991-1-2 quedan del lado de la seguridad. Adicionalmente, estos ensayos proporcionaron una gran base de datos para la calibración de un método para predecir el flujo de calor recibido por una columna situada fuera del fuego. Los ensayos, llevados a cabo con y sin techo, mostraron que el viento tiene una gran influencia sobre las temperaturas y flujos medidos en la proximidad de la fuente del fuego, mientras que el flujo recibido lejos del foco del incendio resulta inalterado.

4 NUEVO MODELO PARA LA CARGA DE FUEGO EN COLUMNAS BAJO FUEGO LOCALIZADO

4.1 Principios y campo de aplicación

En base a los resultados de la campaña experimental descrita en la Sección 3, se ha desarrollado un nuevo modelo de fuego localizado. El nuevo modelo ha sido validado por comparación con resultados de medidas experimentales de flujo de calor, habiéndose obtenido resultados aceptablemente conservadores en todos los casos.

La idea clave es la discretización del fuego en forma de una llama sólida virtual, construida a partir de cilindros y anillos en su versión más simple o formas suavizadas en modelos avanzados (Figura 4.1).

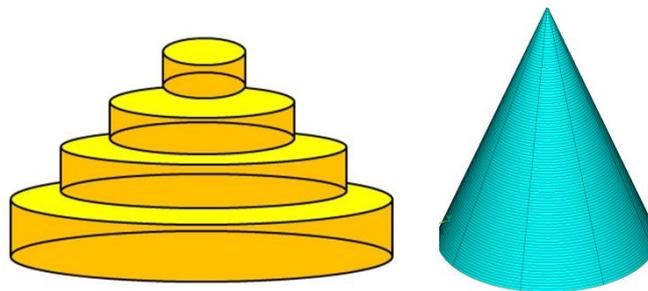


Figura 4.1 Modelado de un fuego localizado empleando discretización cilíndrica o cónica

El flujo radiativo desde la llama sólida virtual se puede calcular en cualquier punto del espacio empleando técnicas estándar de modelado de transmisión de calor por radiación. Una vez se conoce el flujo de calor, es posible determinar la temperatura de una columna de acero ubicada en cualquier posición dentro del sector de incendio.

Si la columna se encuentra dentro de la llama, la temperatura estará gobernada por la convección, mientras que si la columna queda fuera de la llama, la temperatura vendrá principalmente gobernada por la radiación (Figura 4.2).

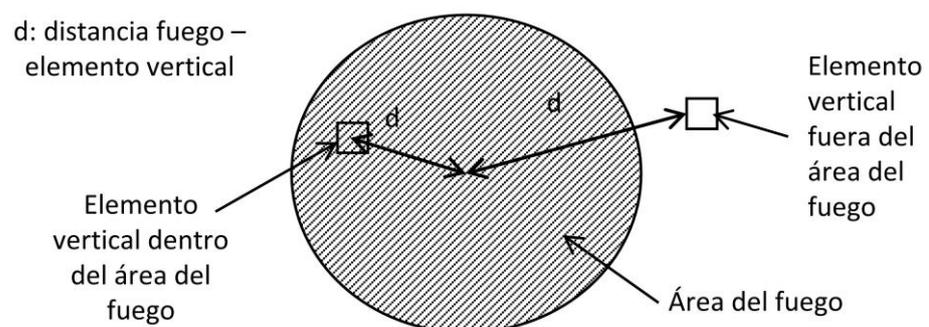


Figura 4.2 Posición relativa entre el fuego y la columna

El modelo asume que la forma del fuego a nivel del suelo es circular, y es aplicable a fuegos localizados que no superen un diámetro de 10 m y un HRR de 50 MW.

El nivel de flujo de calor recibido por la columna depende de en cuál de las siguientes cuatro zonas está situada:

- 1) Fuera del fuego,
- 2) Dentro del fuego,
- 3) Dentro del fuego, en la capa caliente,
- 4) Fuera del fuego, en la capa caliente,

La Figura 4.3 muestra una ilustración de las cuatro zonas.

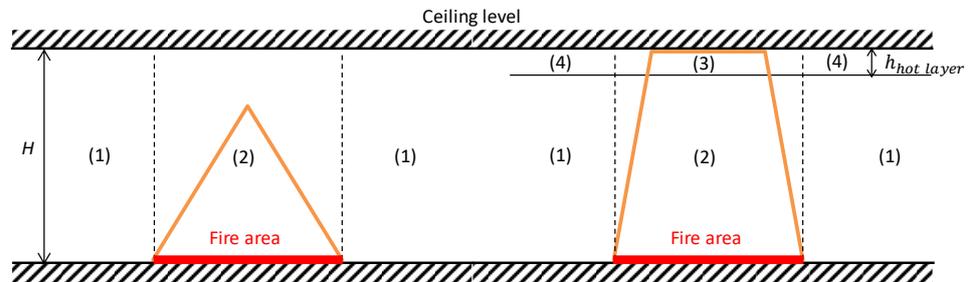


Figura 4.3 Zonas para modelar los efectos de un fuego localizado

Previamente al proyecto LOCAFI, existían varios modelos para las zonas 2, 3 y 4, pero no había ningún modelo disponible para la zona 1.

El nuevo modelo cubre todas las situaciones, con especial énfasis en la zona 1, viniendo descrito en detalle en el Anexo A del presente documento.

La Sección A.2 describe el modelo para columnas fuera de la zona del fuego, esto es, zonas 1 y 4. La Sección A.3 describe el modelo para columnas dentro de la zona del fuego, zonas 2 y 3.

La mayoría de los fuegos son de forma cónica. Sin embargo, el centro del cono se puede desplazar como consecuencia del viento. Por este motivo, las zonas 2 y 3 se aproximan como cilindros, con sus lados alineados con el contorno del fuego.

Las zonas 3 y 4 sólo existen cuando la llama impacta el techo. En este caso, el valor recomendado de la altura de la capa caliente ($h_{hot\ layer}$) es $H/10$, pero esto se puede adaptar según lo indicado en el Anexo A.

El método se divide en dos pasos generales; en primer lugar el cálculo del flujo de calor recibido por un segmento de la columna, y posteriormente cálculo de la temperatura de dicho segmento.

Nota al lector

En este documento, se realiza una distinción clara entre el flujo incidente y el flujo absorbido.

El flujo de calor neto por radiación (W/m^2) viene dado por:

$$\dot{q}_{net,rad} = \dot{q}_{abs,rad} - \dot{q}_{emi,rad}$$

Donde $q_{abs,rad}$ es el flujo de calor por radiación absorbido (W/m^2) y $q_{emi,rad}$ es el flujo de calor por radiación (W/m^2) emitido por la superficie. Los flujos de calor absorbido y emitido se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$\dot{q}_{net,rad} = \alpha_s \dot{q}_{inc,rad} - \varepsilon_s \sigma (\theta_s + 273)^4$$

Donde α_s es la absorptividad, la cual por la ley de Kirchhoff es igual a la emisividad de la superficie ε_s , $q_{inc,rad}$ es el flujo de calor por radiación incidente (W/m^2), θ_s ($^{\circ}C$) es la temperatura de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann (W/K^4m^2).

Por tanto, el flujo de calor por radiación absorbido por la superficie es igual a:

$$\dot{q}_{abs,rad} = \varepsilon_s \dot{q}_{inc,rad}$$

donde el flujo de calor por radiación incidente puede ser expresado por su parte como:

$$\dot{q}_{inc,rad} = \sum_i \sigma \varepsilon_{f,i} \phi_i (\theta_{f,i} + 273)^4$$

Donde $\varepsilon_{f,i}$ es la emisividad de la i-ésima fuente de calor, ϕ_i es el factor de forma de la i-ésima fuente y $\theta_{f,i}$ es la temperatura ($^{\circ}C$) de la i-ésima fuente.

4.2 Herramientas de cálculo para modelar flujos de calor en fuegos localizados

El modelo analítico que describe actualmente el comportamiento térmico de las columnas de acero bajo un fuego localizado es complejo e inapropiado para su uso en una oficina técnica. Esta sección describe cuatro herramientas de cálculo que implementan el modelo del Anexo A del presente documento.

4.2.1 Mapas de contorno

4.2.1.1 Introducción

Esta sección describe un método rápido para calcular flujos de calor, basado en mapas de contorno. Los mapas se han generado empleando el modelo descrito en el Anexo A, permitiendo al usuario obtener el valor del flujo de calor incidente en la posición de interés, sin necesidad de llevar a cabo cálculos detallados. El flujo de calor absorbido se obtiene multiplicando el flujo incidente por la emisividad.

Los mapas de contorno muestran el flujo de calor a distancias fijas desde el fuego (descrito por su diámetro y HRR) en las direcciones vertical y horizontal.

Los flujos de calor para la zona 2 se presentan también en los gráficos, calculados según el modelo de Heskestad (descrito en la Sección A.3). En dicho caso, los mapas de contorno proporcionan directamente el flujo de calor absorbido.

Los mapas de contorno para otros casos se presentan en el Anexo C.

4.2.1.2 Empleo de los mapas de contorno en el diseño

A la hora de emplear un mapa de contorno, el calculista debe simplificar el escenario de fuego de cálculo como se indica:

Paso a) La forma del fuego viene representada por su superficie equivalente circular,

Paso b) La columna se modela mediante un perfil equivalente de sección rectangular (Anexo G del EN 1991-1-2^[2]),

Paso c) La columna se ha de rotar de manera que la cara de mayor dimensión del rectángulo sea normal al fuego.

Paso a)

Si el principal combustible implicado en el fuego localizado no tiene forma circular, éste se debe modelar como un círculo con un diámetro que proporcione una superficie igual a nivel del suelo, según la Ecuación (4.1):

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \text{ m} \quad (4.1)$$

Donde:

D_{fire} diámetro equivalente (m)

S área del fuego localizado (m²)

Para formas complejas, o formas con una relación de aspecto (longitud/ancho) superior a 2, se recomienda que la superficie del fuego se subdivida en fuegos más pequeños, los cuales se pueden aproximar más fácilmente mediante áreas circulares. Los flujos de múltiples fuegos se pueden adicionar, tal y como se expone en la Sección A.4.

Paso b)

Se debe dibujar una envolvente rectangular alrededor de la sección transversal de la columna (Figura 4.4). Esta consideración es consistente con las hipótesis del Anexo G del EN 1991-1-2. La simplificación de la geometría de la sección evita la necesidad de tener en cuenta fenómenos complejos como el efecto sombra (que se da cuando parte de una sección “hace sombra” a otras partes para la radiación incidente).

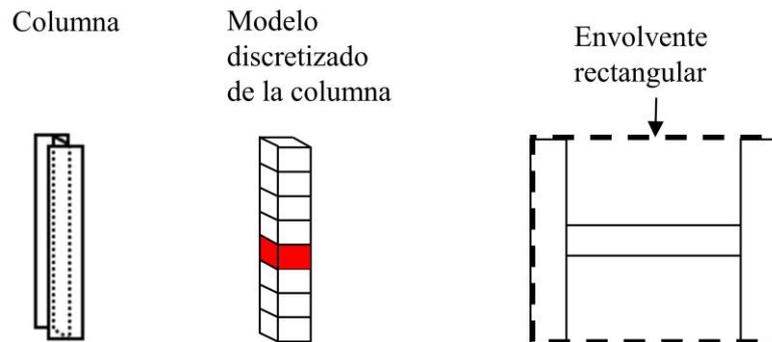


Figura 4.4 Modelado de una columna con perfil en H y modelo detallado de un segmento de la misma

Paso c)

La orientación se define respecto a una línea que une la columna al eje central de la fuente del fuego (Figura 4.5).

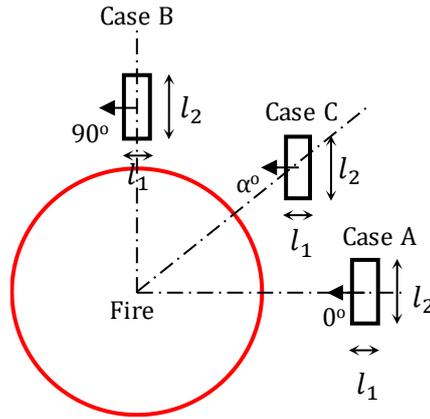


Figura 4.5 Posibles orientaciones de la columna

En el probable caso de que no exista un mapa de contorno que proporcione las propiedades exactas del fuego equivalente, se debe seleccionar aquel mapa de contorno con HRR y diámetro inmediatamente superior, el cual proporcionará un resultado conservador. El usuario puede también proceder por interpolación.

Una vez obtenidos los flujos de calor mediante de los mapas de contorno, el flujo promedio radiativo incidente recibido por la sección puede calcularse a través de la Ecuación (4.2). Los valores se ponderan en relación a las dimensiones de las caras de la sección.

$$\dot{h}_{m,r} = \frac{2l_1\dot{h}_{r,1} + l_2\dot{h}_{r,2}}{2l_1 + 2l_2} \quad \text{si } \alpha = 0^\circ \quad (4.2a)$$

$$\dot{h}_{m,r} = \frac{l_1\dot{h}_{r,1} + 2l_2\dot{h}_{r,2}}{2l_1 + 2l_2} \quad \text{si } \alpha = 90^\circ \quad (4.2b)$$

Donde:

$\dot{h}_{m,r}$ es el flujo de calor radiativo incidente promedio en la sección

$\dot{h}_{r,1}$ es el flujo de calor radiativo incidente en la cara 1 de la sección, obtenido del mapa de contorno apropiado

$\dot{h}_{r,2}$ es el flujo de calor radiativo incidente en la cara 2 de la sección, obtenido del mapa de contorno apropiado

Para columnas con caras que no estén orientadas en perpendicular al fuego ($0 < \alpha < 90^\circ$), como el Caso C mostrado en la Figura 4.5, las dimensiones de las caras requieren un ajuste antes de poder aplicar los mapas de contorno, como muestra la Figura 4.6. Tras aplicar esta rotación, se puede usar la Ecuación (4.2a) con los nuevos valores l_1 y l_2 .

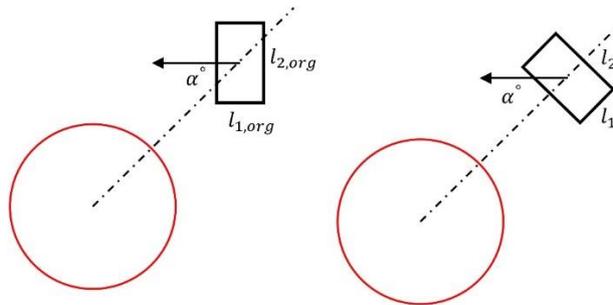


Figura 4.6 Ajuste para columnas que no están orientadas perpendicularmente al fuego

Las dimensiones originales son $l_{1,org}$ y $l_{2,org}$. Las dimensiones ajustadas vienen dadas por:

$$l_2 = l_{1,org} \times \sin \alpha + l_{2,org} \times \cos \alpha \quad (4.3)$$

$$l_1 = (l_{1,org} + l_{2,org}) - l_2 \quad (4.4)$$

El flujo de calor se calcula entonces según la Ecuación (4.2a) con los nuevos valores de l_1 y l_2 .

Los mapas de contorno suponen que la llama no impacta contra el techo. Si se encontrara que esto ocurre (por aplicación de la Ecuación (A.2), el calculista deberá adicionalmente considerar la ‘zona caliente’ (zona 4 en la Figura 4.3). El flujo de calor en esta zona se debe calcular mediante la Ecuación (A.21). En la mayoría de los casos, el flujo de calor en la zona 4 resulta superior al de la zona 1 (cubierta por los mapas de contorno). En consecuencia, la temperatura más alta de la columna, la cual se debe emplear en las comprobaciones de resistencia de la Sección 5, se encontrará en la zona 4.

4.2.2 Hojas de cálculo

Es posible obtener mayor precisión implementando las ecuaciones en hojas de cálculo, empleando el modelo presentado en los Anexos A y B de este documento. En una hoja de cálculo se pueden tener en cuenta los factores de forma reales entre el fuego y las caras de la sección. La Figura B.9 y Figura B.11 presentan ejemplos de hojas de cálculo.

Puesto que la transmisión de calor es un fenómeno complejo, las ecuaciones requeridas son numerosas y complicadas de manejar. Se recomienda que el cálculo no sea implementado por personas no expertas en la materia.

4.2.3 OZone

Como alternativa a que el calculista lleve a cabo los cálculos a mano o desarrolle sus propias herramientas de cálculo, se han desarrollado determinados programas que implementan el modelo térmico de LOCAFI. Una herramienta disponible para este propósito es OZone.

OZone es un software de fácil manejo que permite calcular las acciones térmicas generadas por un fuego y la evolución de la temperatura en un elemento estructural de acero. OZone incluye curvas de fuego nominales y dos tipos de modelos de fuego natural: fuegos localizados y fuegos de sector. OZone (junto con otros programas de cálculo en fuego desarrollados por ArcelorMittal) se puede obtener en:

<http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html>

Para fuegos de sector, Ozone permite el uso de modelos de una o dos zonas, tal y como define el Anexo D del EN 1991-1-2. La principal hipótesis en estos modelos es que el sector está dividido en zonas donde la distribución de temperatura es uniforme en cualquier instante durante el fuego. En los modelos de una zona, la temperatura se considera uniforme en todo el sector. Este tipo de modelo es válido, por tanto, en fuegos totalmente desarrollados. Los modelos de dos zonas resultan más apropiados cuando el fuego permanece confinado. En este caso, el modelo de dos zonas representa mejor la distribución de temperatura en el recinto, con una capa caliente próxima al techo y una capa fría debajo.

En espacios abiertos o sectores grandes, donde no es previsible que se produzca el *'flashover'*, el comportamiento de la estructura se debe analizar bajo condiciones de fuego localizado. El procedimiento de cálculo de fuego localizado implementado en OZone se basa en el modelo de LOCAFI.

Según se expone en la Sección A.2.1.1, los principales intercambios de calor por radiación se modelan representando el fuego como una llama sólida virtual que irradia en todas las direcciones. El primer paso de este cálculo define la geometría de la llama sólida virtual que representa el fuego localizado y la distribución de temperatura en función del tiempo. La forma de la llama virtual sólida puede ser cilíndrica o cónica. La llama de forma cilíndrica supone un modelo más simplista, pero que normalmente sobreestima los flujos de calor por radiación. Ozone implementa una forma cónica para la llama sólida virtual, la cual ha demostrado predecir el flujo de calor de manera más precisa.

Para aquellos casos en los que la llama supera el nivel del techo, el cilindro o cono se debe de tomar de la misma altura que éste. Se debe considerar entonces un anillo radiante adicional fuera del cilindro o cono, que representa la extensión de la llama bajo el techo.

El cálculo por radiación se implementa en OZone sin el uso de integrales de superficie (como las empleadas en SAFIR, véase Sección 4.2.4). En su lugar, el modelo se basa en factores de configuración apropiados para la forma del elemento, según lo mostrado en la Ecuación (A.9).

El flujo se calcula por separado para cada una de las 4 caras del perímetro en forma de caja del perfil y se aplica finalmente al perímetro el valor promedio del flujo. Esto implica que el efecto sombra no es tenido en cuenta. El acoplamiento entre el fuego localizado y el fuego de sector permite una combinación de las influencias de los flujos radiativos.

Los parámetros de entrada requeridos para modelar un fuego localizado incluyen la posición, diámetro y evolución del HRR con el tiempo para un número máximo de 5 fuegos.

Para modelos de fuego natural, se pueden emplear varios escenarios. Para fuegos de sector, es necesario definir tanto las características del recinto como del fuego, empleando el Anexo E del EN1991-1-2 o bien un fuego definido por el usuario.

Si no se define el recinto, se asume que el fuego localizado se desarrolla en un espacio abierto. Si por el contrario éste sí que se define, junto con el fuego localizado, OZone calcula las zonas caliente y fría en el sector considerando automáticamente el área máxima del fuego como la suma de las áreas de todos los fuegos localizados. Para el cálculo de la temperatura, OZone propone tres opciones: temperatura de la zona caliente, temperatura del fuego localizado, o la máxima de las dos (dada en el programa como *'Máxima de las dos'*).

4.2.4 Modelos de elementos finitos

Si el calculista busca un mayor grado de precisión, puede emplear programas de cálculo por elementos finitos (FE) como SAFIR® o ANSYS®. El empleo de un modelo de elementos finitos reduce el número de simplificaciones necesarias y presenta las siguientes ventajas:

- Se puede obtener una forma cónica más precisa para la aproximación de la llama sólida virtual, en lugar de una sucesión de cilindros y anillos.
- Es posible considerar la forma real de la columna, incluyendo así el efecto sombra en la transmisión de calor por radiación.
- Los factores de forma entre cada cara del perfil y la llama sólida virtual pueden ser calculados de manera independiente.
- Es posible calcular el perfil de temperaturas no uniforme a lo largo de la sección.
- Se puede considerar un comportamiento termo-mecánico acoplado. Un ejemplo de ello se puede dar en el *'thermal bowing'* de una columna calentada de manera asimétrica.

Los diferentes paquetes de cálculo por elementos finitos implementan el modelo de manera distinta, en particular a nivel de su discretización. Para analizar los aspectos a tener en cuenta en la implementación, a continuación se proporciona una breve descripción de las consideraciones implementadas en SAFIR.

Se implementan dos formas de llama en SAFIR; cilíndrica y cónica. El usuario es libre de seleccionar cualquiera de las dos, dependiendo de su preferencia. En la Figura 4.7 se muestra un ejemplo de llama cónica.

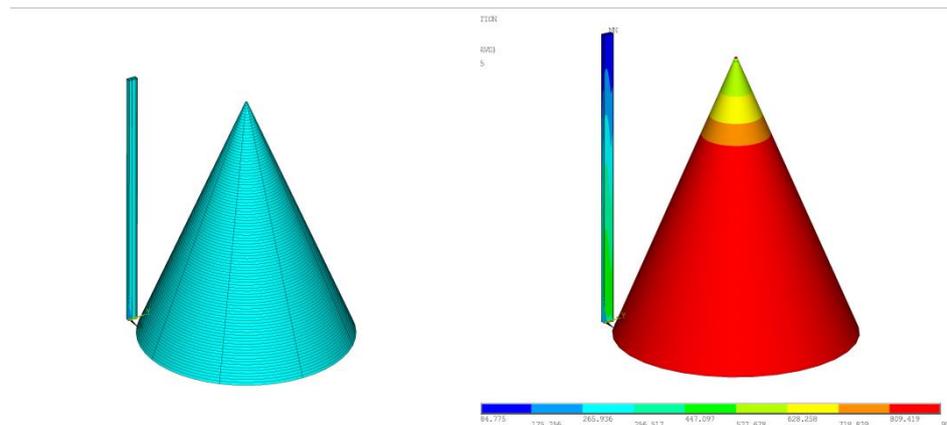


Figura 4.7 Forma de la llama (izquierda) y temperatura de la superficie (derecha) en SAFIR

El modelo térmico en SAFIR calcula la temperatura mediante una serie de análisis 2D llevados a cabo en cada punto de integración longitudinal de cada elemento finito estructural seleccionado por el usuario. Los elementos pueden tener cualquier orientación en el espacio.

El flujo de calor en cualquier instante de tiempo se calcula separadamente para cada cara del elemento finito. Esto supone que el flujo incidente desde el fuego localizado al elemento finito es anisótropo; las caras que están orientadas hacia el fuego reciben el flujo más alto, mientras que las caras que se encuentran en el lado opuesto no reciben ningún flujo.

Cuando se calcula el flujo de calor que llega a una cara desde el fuego localizado, las pérdidas por el calor cedido desde la cara a una distancia alejada, supuesta a temperatura ambiente, se añaden automáticamente.

La fuente del fuego se divide en rebanadas horizontales de igual espesor (0.1 m). Este valor es inferior al de 0.5 m recomendado para cálculos a mano (véase Sección A.2.1.1). Cada rebanada y cada anillo se subdivide en 36 sectores de ángulo 10 grados cada uno. Estas divisiones definen una serie de facetas que forman la cara externa de la llama. El flujo de calor por radiación se calcula desde cada faceta hasta cada cara de la sección.

La estructura puede estar sometida a uno o varios focos de fuego localizado. En caso de múltiples fuegos, los flujos desde cada uno de ellos se adicionan.

4.3 Determinación de la temperatura de un segmento de la columna de acero

Esta sección describe el proceso de cálculo de la temperatura de un segmento de una columna, basado en el flujo incidente. Según se describe en la Sección 5, el diseño por elementos requiere temperaturas en lugar de flujos.

La tasa de liberación de calor (HRR) se puede determinar mediante el Anexo E del EN 1991-1-2, que divide la curva de HRR (véase Figura 4.8) en 3 partes: una fase de crecimiento o desarrollo, una fase constante (estado estacionario, si existe) donde el fuego puede estar controlado por combustible o por ventilación, y una fase de decrecimiento o decaimiento. Con esta forma de la curva, la fase más crítica en términos de las acciones térmicas es la fase constante.

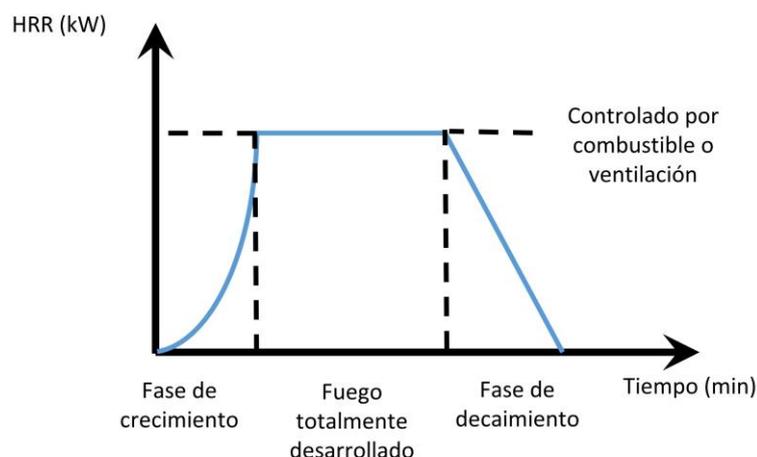


Figura 4.8 Curva HRR calculada según el Anexo E del EN 1991-1-2

La tasa de liberación de calor desde un fuego es una relación dependiente con el tiempo, que sugiere que el flujo de calor se debe calcular de manera incremental (paso a paso). Teniendo en cuenta además el hecho de que el flujo de calor varía a lo largo de la longitud de la columna, la cantidad de cálculos necesarios aumenta considerablemente.

Conforme un segmento de la columna comienza a recibir flujo de calor desde el fuego, su temperatura aumenta progresivamente. En la fase controlada por combustible, el flujo permanece constante, lo que supone que se alcanzará en última instancia un punto donde el flujo absorbido por el segmento quede en equilibrio con el flujo radiado desde éste al ambiente que le rodea. En este punto se dará la temperatura estacionaria.

Si el segmento posee un gran volumen, el tiempo empleado para alcanzar su temperatura de régimen permanente será largo. En muchos casos, el tiempo requerido para alcanzar esta temperatura es mayor que la duración del propio fuego, significando esto que nunca se alcanzará el régimen permanente.

Se puede asumir de forma conservadora en el cálculo que el régimen permanente siempre se alcanza. Esto reduce significativamente el esfuerzo computacional requerido, pues desaparece la dependencia del tiempo en el cálculo. Sin embargo, la temperatura estacionaria que se supone alcanzada puede ser considerablemente superior a la temperatura realmente alcanzada. Si se está en condiciones de llevar a cabo un análisis más avanzado, teniendo en cuenta la dependencia en el dominio del tiempo, se alcanzará con mayor probabilidad un diseño más rentable. El método avanzado viene referido más adelante como 'método incremental', recogido en la Sección 4.3.2.

El método recomendado para la obtención de la temperatura dependerá de la precisión con la que se calcule el flujo. Para cada uno de los cuatro métodos presentados en la Sección 4.2 se recomienda lo siguiente:

- Para cálculos con mapas de contorno, el flujo total de calor viene dado para el estado estacionario. La temperatura se calcula según las ecuaciones presentadas en la Sección 4.3.1.
- En el caso de resolución mediante hojas de cálculo, se recomienda obtener el flujo total de calor absorbido por un segmento de la columna para los siguientes valores de HRR: 25%, 50%, 75% y 100% del máximo. La temperatura se debe calcular en este caso empleando el método incremental (Sección 4.3.2).
- OZone lleva a cabo el cálculo de acuerdo al método incremental. No se requieren parámetros de entrada adicionales.
- Los programas de cálculo por elementos finitos poseen la capacidad de calcular tanto los flujos de calor como las temperaturas simultáneamente en el mismo análisis.

Puesto que los diferentes segmentos de la columna ubicados a distintos niveles a lo largo de su altura reciben diferentes flujos, esto resulta en diferentes distribuciones de temperatura de un nivel a otro. Estas diferencias dan lugar a un flujo de calor por conducción en la dirección longitudinal de la columna que tiende a igualar la temperatura del acero en segmentos adyacentes. Tener en cuenta este efecto requeriría realizar un modelo 3D de la columna. Distintos modelos numéricos han demostrado que este efecto es bastante reducido, de tal forma que la distribución de temperatura real queda suficientemente bien aproximada mediante una serie de análisis térmicos 2D llevados a cabo en diferentes niveles, cada uno con las condiciones de contorno que prevalezcan a dicho nivel.

4.3.1 Método estacionario

Conocido el valor promedio del flujo de calor por radiación absorbido por un segmento, su temperatura estacionaria se puede calcular de forma sencilla mediante las ecuaciones de los Eurocódigos.

Si el segmento de cálculo se encuentra fuera del fuego, el intercambio de calor por convección se dará con el aire ambiente (20°C), excepto si éste está acoplado con un fuego de sector. En cuanto al intercambio de calor por radiación, la sección absorberá $\epsilon \dot{h}_{m,r}$ y también radiará hacia el ambiente.

La ecuación de equilibrio térmico se expresa por tanto:

$$0 = \alpha_c(\theta - 20) + \sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4] - \varepsilon\dot{h}_{m,r} \quad (4.5)$$

Donde:

- α_c es el coeficiente de transmisión de calor por convección = 35 W/(m²K) según el EN 1991-1-2
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann, igual a 5.67×10⁻⁸ W/(m²K⁴)
- ε es la emisividad del acero (el EN 1993-1-2 proporciona un valor de 0.7)
- θ es la temperatura del acero, en °C

La temperatura estacionaria es independiente de la masividad y de las propiedades del material de la sección.

Esta ecuación se puede resolver iterando, dando lugar a una relación entre θ and $\dot{h}_{m,r}$. Empleando los valores recomendados de σ y ε , se puede representar la Ecuación (4.5), según muestra la Figura 4.9.

En caso de que el elemento esté envuelto por las llamas (Heskestad) o situado dentro de la capa caliente (Hasemi), el término $\varepsilon\dot{h}_{m,r}$ se debe reemplazar por el flujo absorbido.

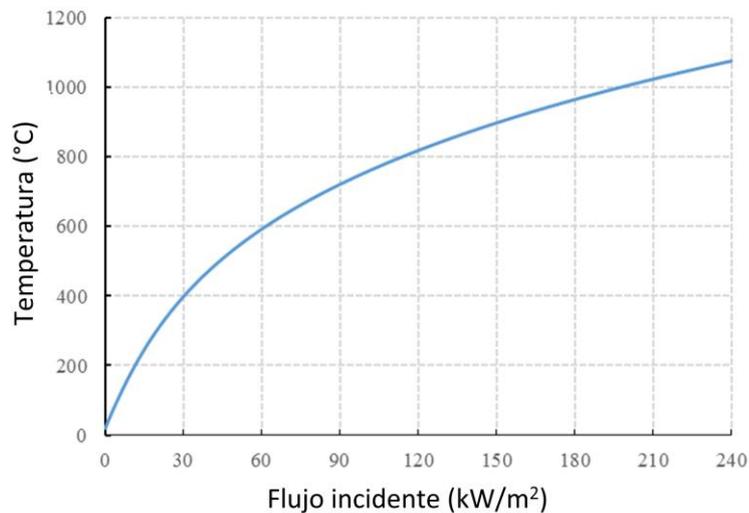


Figura 4.9 Relación entre la temperatura estacionaria y el flujo de calor incidente

4.3.2 Método incremental

Una vez calculado el flujo de calor incidente, se puede emplear el método incremental descrito en el EN 1993-1-2 para determinar la relación temperatura-tiempo. La temperatura de la sección depende del flujo neto de calor, que es la diferencia entre el flujo de calor incidente y el emitido. El flujo neto de calor viene dado por la ecuación de equilibrio térmico, de la cual la Ecuación (4.6) constituye un caso particular:

$$\rho_a c_a(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} [\varepsilon\dot{h}_{m,r} - \alpha_c(\theta - 20) - \sigma\varepsilon((\theta + 273)^4 - 293^4)] \quad (4.6)$$

Donde:

- ρ_a es la densidad del acero, en kg/m^3
 c_a es el calor específico del acero, en $\text{J}/(\text{kgK})$
 A_m/V es la masividad de la sección del segmento estudiado, en m^{-1}

A partir de esta ecuación, la temperatura se puede calcular de manera incremental empleando un paso de tiempo Δt (por ejemplo 5 s) mediante:

$$\theta^{t+\Delta t} = \theta^t + \Delta t \frac{A_m}{V} \frac{1}{\rho c_a(T^t)} [\varepsilon \dot{h}_{m,r} - \alpha_c(\theta - 20) - \sigma \varepsilon ((\theta + 273)^4 - 293^4)] \quad (4.7)$$

Donde:

$\theta^{t+\Delta t}$ es la temperatura en el instante $t+\Delta t$.

En caso de que el elemento esté envuelto por las llamas (Heskestad) o situado dentro de la capa caliente (Hasemi), el término $\varepsilon \dot{h}_{m,r}$ se debe reemplazar por el flujo absorbido.

Todos los parámetros dependientes del tiempo en el término de la derecha de la ecuación deben ser evaluados en el instante t conforme el HRR varía con el tiempo. Esta ecuación se puede implementar de manera sencilla en una hoja Excel. Los cálculos de temperatura en OZone se basan en este método.

5 CÁLCULO DE LA COLUMNA

Las normas EN 1993-1-2 y EN 1994-1-2 proporcionan modelos para evaluar la resistencia mecánica y el cumplimiento del criterio de integridad de un elemento estructural que han de ser satisfechos al ser expuesto éste a una curva de fuego nominal o natural. Estas normas definen los valores de cálculo de las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales en relación a sus valores característicos. Los valores de cálculo vienen dados por los correspondientes valores característicos divididos por el coeficiente parcial $\gamma_{M,fi}$. Sin embargo, puesto que el valor recomendado de $\gamma_{M,fi} = 1.0$ está aceptado por todos los Anejos Nacionales, las propiedades térmicas normalmente son referidas sin ninguna designación, ya sea característica o de cálculo.

5.1 Comprobaciones

La comprobación se expresa como el requisito, tras un tiempo t de exposición al fuego, de que:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (5.1)$$

No será necesario considerar los efectos de las acciones indirectas (fuerzas internas y momentos inducidos en la estructura por las deformaciones y expansión térmica restringida) cuando la seguridad frente a incendio se base en la curva normalizada tiempo-temperatura. En otros casos, tampoco es necesario considerar las acciones indirectas cuando su efecto se identifique como despreciable o bien las condiciones de contorno o el modelo de cálculo sean conservadores.

5.2 Carga

De manera simplificada, el valor de $E_{fi,d}$ para el análisis por elemento se puede tomar como:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (5.2)$$

Where:

E_d es el valor de cálculo del efecto de la combinación fundamental de acciones (estado límite último) dado en el EN 1990

η_{fi} es el factor de reducción para el nivel de carga dado

El valor del factor de reducción η_{fi} depende de si se emplea la Ecuación 6.10 o bien las Ecuaciones 6.10a y 6.10b, dadas en el EN 1990, para la combinación fundamental.

Si se emplea la Ecuación 6.10 del EN 1990 para la combinación fundamental, el factor de reducción η_{fi} vendrá dado por:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + (\Psi_{1,1} \text{ o } \Psi_{2,1}) Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (5.3)$$

Si se emplean las Ecuaciones 6.10a y 6.10b para la combinación fundamental, el factor de reducción η_{fi} vendrá dado por el menor de los valores proporcionados por las dos expresiones siguientes:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + (\Psi_{1,1} \text{ o } \Psi_{2,1}) Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1}} \quad (5.4)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + (\Psi_{1,1} \text{ o } \Psi_{2,1}) Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (5.5)$$

Donde:

G_k	es el valor característico de la acción permanente
$Q_{k,1}$	es el valor característico de la acción variable dominante
ξ	es el coeficiente de reducción de las acciones permanentes desfavorables, dado en el EN 1990
$\Psi_{0,1}$	es el coeficiente de combinación de las acciones variables
$\Psi_{1,1}/\Psi_{2,1}$	es el coeficiente de simultaneidad de las acciones variables

Nótese que los coeficientes de reducción, simultaneidad y combinación son parámetros determinados por cada país (*Nationally Determined Parameters*) y, por tanto, varían de un país a otro. El calculista debe asegurarse de que está empleando los valores adecuados.

5.3 Resistencia

Para un elemento estructural con distribución de temperatura no uniforme, la resistencia se puede obtener como aquella correspondiente a una temperatura uniforme igual a la máxima alcanzada en el elemento en el instante considerado.

La temperatura θ del elemento se determina según los métodos descritos en la Sección 4. La temperatura de la columna debe ser calculada a distintas alturas, debiéndose emplear la temperatura más alta para determinar la resistencia de la misma.

El modelado ha demostrado que la temperatura máxima suele darse alrededor de 1/3 de la altura de la columna, siempre y cuando la llama no impacte el techo. Cuando la llama impacta el techo, es probable que la temperatura máxima se dé en la zona caliente (zona 4 de la Figura 4.3).

5.3.1 Clasificación de la sección

Del mismo modo que para cálculo a temperatura ambiente, las secciones que trabajan total o parcialmente a compresión se deben clasificar, a fin de establecer su resistencia de cálculo apropiada.

Puesto que la resistencia y el módulo elástico del acero se reducen a diferentes ritmos en situación de incendio, la clasificación seccional a temperatura elevada puede diferir respecto a la de temperatura ambiente.

Sin embargo, más que determinar la clasificación de la sección a cada temperatura, se realiza una única clasificación, basada en el comportamiento a temperatura ambiente. La clasificación se lleva a cabo empleando las reglas del EN 1993-1-1, excepto por el valor de ε , que en situación de incendio viene dado por el apartado 4.2.2 del EN 1993-1-2 como:

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.6)$$

donde f_y es el límite elástico a 20°C.

El coeficiente 0.85 tiene en cuenta la variación de las propiedades del material a temperatura elevada, siendo una aproximación de $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{y,\theta}}$. De esta forma, es posible que una columna tenga una clasificación más desfavorable en fuego que a temperatura ambiente, por ejemplo una sección Clase 3 a temperatura ambiente se puede convertir en una sección de Clase 4 en fuego.

Las reglas para calcular la resistencia de secciones Clase 4 en fuego se presentan en el EN 1993-1-2^[3]. El estudio en profundidad de este tema queda fuera del alcance de la presente guía.

5.3.2 Resistencia a pandeo

El valor de cálculo de la resistencia a pandeo de las columnas de Clase 1, 2 o 3 con temperatura uniforme θ_a en un instante t se determina de forma similar que a temperatura ambiente, pero con ciertos ajustes para considerar las propiedades reducidas del material a temperatura elevada. La resistencia de cálculo viene dada por el apartado 4.2.3.2 del EN 1993-1-2 mediante:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.7)$$

El coeficiente de reducción a pandeo χ_{fi} debe tomarse como el menor de los valores entre los ejes ‘y-y’ y ‘z-z’, determinados de acuerdo con la expresión:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (5.8)$$

Donde:

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right) \quad (5.9)$$

Con:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.10)$$

La esbeltez adimensional a una temperatura uniforme θ_a viene dada por:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (5.11)$$

Donde:

- A es el área de la sección de la columna de acero
- $k_{y,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el límite elástico del acero dependiente de su temperatura
- $k_{E,\theta}$ es el coeficiente de reducción para el módulo de elasticidad del acero dependiente de su temperatura
- f_y es el límite elástico del acero
- $\bar{\lambda}$ es la esbeltez adimensional a temperatura ambiente

Los coeficientes de reducción $k_{y,\theta}$ y $k_{E,\theta}$ son dependientes de la temperatura. Sus valores numéricos vienen recogidos en el EN 1993-1-2^[3] y se muestran en la Figura 5.1.

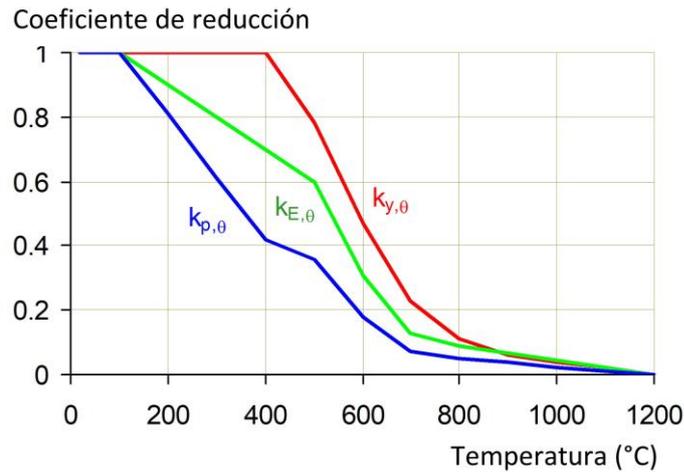


Figura 5.1 Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperatura elevada

5.3.3 Longitudes de pandeo

El EN 1993-1-2 en su apartado 4.2.3.2(3) recomienda que la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$ se determine igual que para temperatura ambiente salvo que, para pórticos arriostrados, la longitud de pandeo l_{fi} tenga en cuenta la rigidez de los extremos de la columna, como se muestra en la Figura 5.2. Esto puede realizarse siempre que cada planta contenga un sector de incendio independiente, y que la resistencia al fuego de los elementos del edificio que separan estos sectores de incendio no sea menor que la resistencia al fuego de la propia columna. En estas condiciones, puesto que los tramos de columna situados en los sectores de incendio superior e inferior son mucho más rígidos que la columna ubicada dentro del propio sector de incendio, se supone que los extremos de la columna expuesta al fuego estarán restringidos, pudiendo considerarse como empotrados.

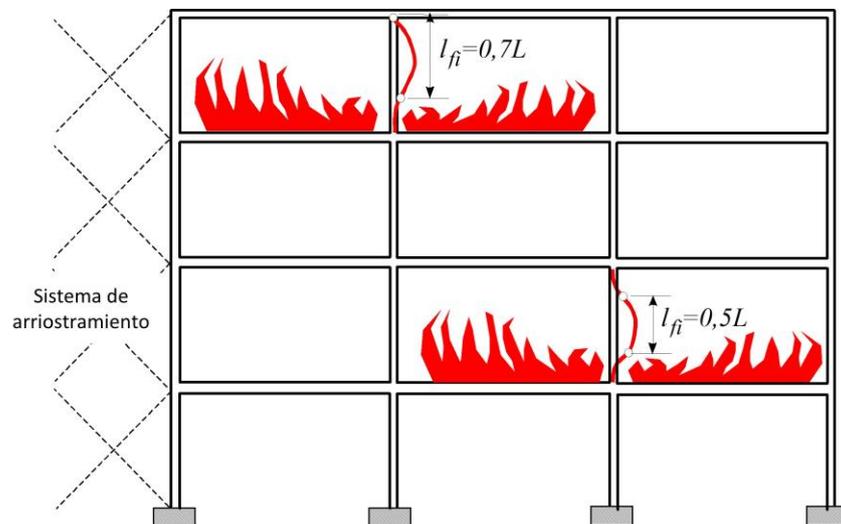


Figura 5.2 Longitudes de pandeo de columnas en situación de incendio.

5.4 Determinación de la resistencia mediante análisis por elementos finitos

Como alternativa al modelo mecánico descrito en la Sección 5.3, la resistencia de una columna puede ser determinada mediante el empleo de software de análisis por elementos finitos.

Los programas de cálculo por elementos finitos empleados deben de ser capaces de llevar a cabo un análisis ‘acoplado’, donde las partes térmica y mecánica del análisis se puedan realizar simultáneamente.

El análisis térmico se debe llevar a cabo empleando un ‘*solver*’ capaz de calcular el flujo de calor incidente desde una ‘llama sólida’ emisora. La forma de la llama ha de definirse de acuerdo con las ecuaciones presentadas en la Sección A.2. No se requieren capacidades de cálculo de dinámica de fluidos (CFD). Esto se explica con mayor detalle en la Sección A.2.1.1.

Para la parte de análisis mecánico, se recomienda emplear un modelo de material no lineal. Según la preferencia del usuario, se pueden emplear elementos finitos tipo barra o lámina. En ambos casos, se debe procurar garantizar que las imperfecciones iniciales sean tenidas en cuenta. En el Anexo C del EN 1993-1-5 ^[18] se puede encontrar ayuda adicional para el modelado por elementos finitos.

6 REFERENCIAS

- 1 EN 1990 (2002): Eurocode 0: Basis of structural design
- 2 EN 1991-1-2 (2002): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- 3 EN 1993-1-2 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- 4 EN 1994-1-2 (2005): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- 5 Wang, Y., Burgess, I., Wald, F. and Gillie, M. (2012) Performance-Based Fire Engineering of Structures, CRC Press. Taylor & Francis Group
- 6 Lennon, T. (2011) Structural Fire Engineering, ICE Publishing
- 7 Franssen, J. M. and Vila Real, P. (2015) Fire design of steel structures, 2nd Edition, ECCS Eurocode Design Manuals, Wiley VCH
- 8 Simms, W.I. (2012) Fire resistance design of steel framed buildings. P375, The Steel Construction Institute
- 9 Guide to the advanced fire safety engineering of structures (2007), Institution of Structural Engineers.
- 10 Heskestad, G. (1972) Similarity relations for the initial convective flow generated by fire, ASME Paper 72-WA/HT-17.
- 11 Hasemi, Y. and Tokunaga, T. (1984) Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames, Fire Science & Technology 4(1):15-26
- 12 Franssen, J.M. and Scifo, A. (2013) LOCAFI D6: Description of all parameters that characterise the tests - ULg. (Part of 'Temperature assessment of a vertical steel member subjected to Localised Fire' RFCS project)
- 13 Nadjai, A. and Sanghoon, H. (2016) LOCAFI D15: Background document of the methodology – Ulster. (Part of LOCAFI RFCS project)
- 14 Nadjai, A. and Sanghoon, H. (2013) LOCAFI D7: Report of all detailed experimental data gathered during localised fire tests - Ulster (Part of LOCAFI RFCS project)
- 15 Fire Dynamics Simulator (FDS) (2017), FDS User's Guide, FDS Version 6.5.3, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 16 Thauvoye C., (2013) LOCAFI D8-9 Numerical simulation of tests, (Part of LOCAFI RFCS project)
- 17 Fire Dynamics Simulator (FDS) (2013), FDS Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 18 EN 1993-1-5(2006): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements
- 19 Vassart, Olivier et al., (2014) Eurocodes: Background and applications. Structural fire design. Worked examples. EUR Scientific and Technical Research Reports. Publications Office of the European Union.
(Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/eurocodes-background-and-applications-structural-fire-design-worked-examples>)
- 20 Tondini, N. and Franssen, J.M. (2017) Analysis of experimental hydrocarbon localised fires with and without external members, Fire Safety Journal, Vol 92, pp 9-22.

ANEXO A MODELO PARA CALCULAR LA CARGA DE FUEGO EN COLUMNAS SOMETIDAS A FUEGOS LOCALIZADOS

Las considerables evidencias experimentales obtenidas a través de los ensayos presentados en la Sección 3.2, han derivado en la calibración y validación de un modelo analítico para determinar el flujo de calor incidente y el aumento de temperatura en una columna bajo fuego localizado. El modelo se describe en el presente Anexo.

El planteamiento físico de los mecanismos de convección y radiación supone que el modelo es bastante complejo, y por tanto no se prevé que el calculista intente aplicarlo empleando métodos de cálculo a mano, siendo sin embargo posible su implementación en una hoja de cálculo. En su lugar, se han desarrollado diversas propuestas simplificadas que implementan los principios del modelo, presentadas en la Sección 4.

A.1 Introducción

La determinación de la temperatura de una columna sujeta a un fuego localizado se puede abordar empleando el método descrito a continuación. El método permite obtener la temperatura de un segmento de una columna a una determinada altura, pudiéndose emplear secuencialmente, a distintas alturas, para construir el perfil de temperaturas longitudinal.

El método se divide en dos pasos generales; en primer lugar el cálculo del flujo de calor incidente recibido por el segmento, y posteriormente el cálculo de la temperatura del mismo.

El modelo asume que la forma del fuego a nivel del suelo es circular, y es aplicable a fuegos localizados que no superen un diámetro de 10 m y un HRR de 50 MW.

Si el principal combustible implicado en el fuego localizado no tiene forma circular, éste se debe modelar como un círculo con un diámetro que proporcione una superficie igual a nivel del suelo, según la Ecuación (A.1):

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \text{ m} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

D_{fire} diámetro equivalente (m)
 S área del fuego localizado (m²)

Los dominios de aplicación se muestran en la Figura 4.3. La Sección A.2 describe el modelo para columnas situadas fuera del área del fuego (zonas 1 y 4) mientras que la Sección A.3 describe el modelo para columnas situadas dentro del área del fuego (zonas 2 y 3).

A.2 Columnas situadas fuera del área del fuego

Las llamas generadas por un fuego localizado afectan a la columna expuesta principalmente a través del flujo de calor por radiación, siempre y cuando la columna no está envuelta en las propias llamas. La forma de la llama y la posición relativa de la misma con respecto a la columna poseen una gran influencia sobre el flujo de calor por radiación recibido por la ésta.

Para la mayor parte del volumen del sector de incendio, el flujo de calor por convección más allá de la zona del fuego se puede considerar despreciable. Sin embargo, esta consideración no es válida en la capa caliente, la cual se extiende bajo el techo cuando las llamas impactan sobre éste. Para un fuego localizado, la altura de esta capa es generalmente pequeña en comparación con la altura de todo el recinto.

Si existen obstáculos que puedan impedir la propagación del humo bajo el techo, entonces la altura de la capa caliente ($h_{hot\ layer}$) puede ser redefinida en función de la característica geométrica de estos obstáculos (típicamente el canto de las vigas). En la práctica, se recomienda un valor igual al 10% de la altura de techo.

Si la posición de interés queda fuera de la zona caliente, se pueden aplicar diferentes expresiones para predecir el flujo de calor incidente (véase Secciones A.2.1 y A.2.2).

A.2.1 Columna fuera de la capa de humos

El procedimiento se divide en 3 pasos:

- Modelar la geometría de la superficie de la llama,
- Calcular la temperatura de la llama,
- Estimar el flujo de calor por radiación incidente sobre un segmento de la columna de acero.

Se desprecia el flujo de calor por convección, mientras que el flujo de calor por radiación se modela empleando el concepto de llama sólida, esto es, la llama se considera como una superficie sólida que irradia calor hacia la columna.

A.2.1.1 Geometría de la superficie de la llama sólida

El primer paso consiste en construir la superficie de la llama. Se asume una superficie cónica, formada por una serie de cilindros (caras verticales) y anillos (caras horizontales) de diámetro decreciente (Figura A.1).

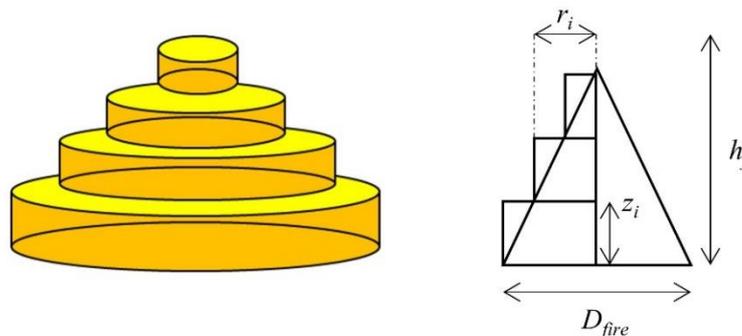


Figura A.1 Modelo de llama sólida (izquierda) y parámetros geométricos (derecha)

La altura de la llama h_f se calcula empleando la correlación proporcionada por el Anexo C del EN 1991-1-2^[2]:

$$h_f = -1.02D_{fire} + 0.0148Q(t)^{0.4} \quad (A.2)$$

Donde:

D_{fire} es el diámetro del fuego (m)

$Q(t)$ es el HRR (velocidad de liberación de calor) del fuego (W)

El radio r_i de un cilindro a la altura z_i es igual a:

$$r_i = 0.5D_{fire} \left(1 - \frac{z_i}{h_f}\right) \quad (A.3)$$

Para facilidad de uso, el número de cilindros empleados para modelar el fuego debe ser limitado. Se recomienda tomar una altura de cilindro de 0.5 m, que proporciona un buen balance entre precisión y manejabilidad. Una simplificación muy conservadora consiste en emplear un único cilindro de altura igual a la altura de la llama h_f . En ese caso, la llama sólida se reduce a dos componentes: un cilindro con un disco en su extremo superior (diámetro = D_{fire}).

A.2.1.2 Propiedades de radiación y temperatura de la llama

El segundo paso consiste en el cálculo de las propiedades de radiación de la llama y, seguidamente, la temperatura de la misma. La temperatura de un cilindro y anillo específico situado a una distancia z_i a lo largo del eje de la llama (Figura A.2) se supone constante e igual al valor dado por:

$$\theta_f(z_i) = \min\left(900; 20 + 0.25(0.8Q(t))^{2/3}(z_i - z_{virt})^{-5/3}\right) \quad (A.4)$$

Donde z_{virt} es el origen virtual de la llama, dado por:

$$z_{virt} = -1.02D_{fire} + 0.00524Q(t)^{0.4} \quad (A.5)$$

Estas fórmulas corresponden a las Ecuaciones C.2 y C.3 del EN 1991-1-2. La longitud h_f se define como el punto donde la temperatura de los gases a lo largo del eje de la llama alcanza 520°C, según la Ecuación (A.4).

Es importante tener en cuenta que el HRR varía con el tiempo, lo que implica que las características de la llama y los flujos de calor variarán también durante el incendio.

Es posible tener en cuenta aquellos casos donde la fuente del fuego no se encuentra a nivel del suelo, sino a una altura diferente z_{fire} , ajustando la altura bajo el techo (h_{ceil} se reemplaza por $h_{ceil} - z_{fire}$).

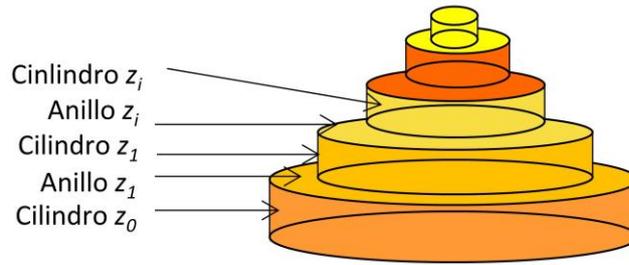


Figura A.2 Modelo simplificado del fuego empleando anillos y cilindros

A.2.1.3 Flujo de calor por radiación recibido por un segmento de la columna

En primer lugar, la sección de la columna se modela como una sección rectangular, independientemente de cuál sea su forma original (Figura A.3). Esta consideración es consistente con las hipótesis del Anexo G del EN 1991-1-2. La simplificación de la geometría evita la necesidad de tener en cuenta fenómenos complejos como el efecto sombra (que se da cuando parte de una sección “hace sombra” a otras partes para la radiación incidente).

La columna se divide en distintos segmentos (de altura z_j) y el flujo de calor se calcula para cada una de las cuatro caras de cada segmento, para posteriormente calcular su valor promedio.

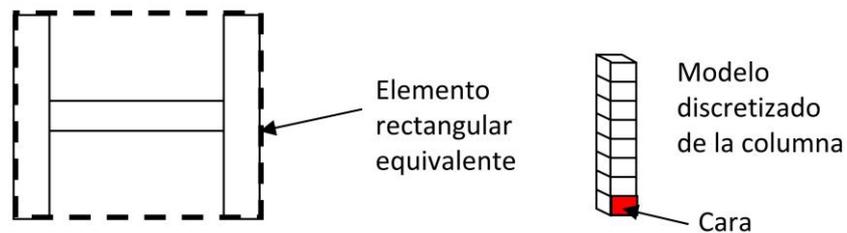


Figura A.3 Modelado de una columna con perfil en H y modelo detallado de un segmento de la misma

Al asumirse que la emisividad y la temperatura son constantes a lo largo de la superficie de cada segmento, el flujo de calor por radiación se puede calcular empleando un factor de forma, el cual mide la fracción del calor total por radiación que sale de una determinada superficie radiante y llega a cierta superficie receptora. Su valor depende del tamaño de la superficie radiante, de la distancia desde ésta a la superficie receptora y de su orientación relativa. Existen fórmulas analíticas para determinar los factores de forma bajo distintos escenarios, incluyendo las formas empleadas aquí para la llama sólida.

El factor de forma \varnothing entre un elemento infinitesimal plano y un cilindro finito viene dado por la Ecuación (A.6). Los parámetros geométricos se muestran en la Figura A.4.

$$\varnothing_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5\} \quad (A.6)$$

Donde:

$$L_1 = \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right)$$

$$L_2 = \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right)$$

$$L_3 = -Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) \right]$$

$$L_4 = -\sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right)$$

$$L_5 = H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B}} \right)$$

Donde:

$$S = \frac{s}{r} \quad X = \frac{x}{r} \quad Y = \frac{y}{r} \quad H = \frac{h}{r}$$

$$A = X^2 + Y^2 + S^2$$

$$B = S^2 + X^2$$

$$C = (H - Y)^2$$

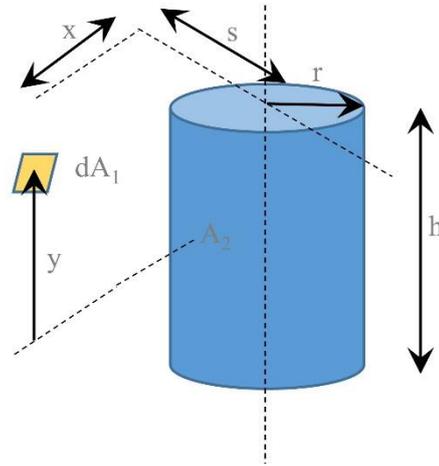


Figura A.4 Parámetros geométricos empleados para calcular el factor de forma entre un plano infinitesimal y un cilindro finito

El flujo de calor por radiación absorbido por la cara 'face_j' desde el cilindro 'cylinder z_i' es:

$$\dot{h}_{cylinder\ z_i \rightarrow face_j} = \sigma \varepsilon (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \quad (A.7)$$

Donde:

ε es la emisividad el acero (el EN 1993-1-2 proporciona un valor de 0.7)

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

$\theta_f(z_i)$ es la temperatura del cilindro z_i , dada por la Ecuación (A.4)
 $\phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j}$ es el factor de forma entre el cilindro z_i y la cara $face_j$, dado por la Ecuación (A.6)

El modelo descrito se muestra en la Figura A.5.

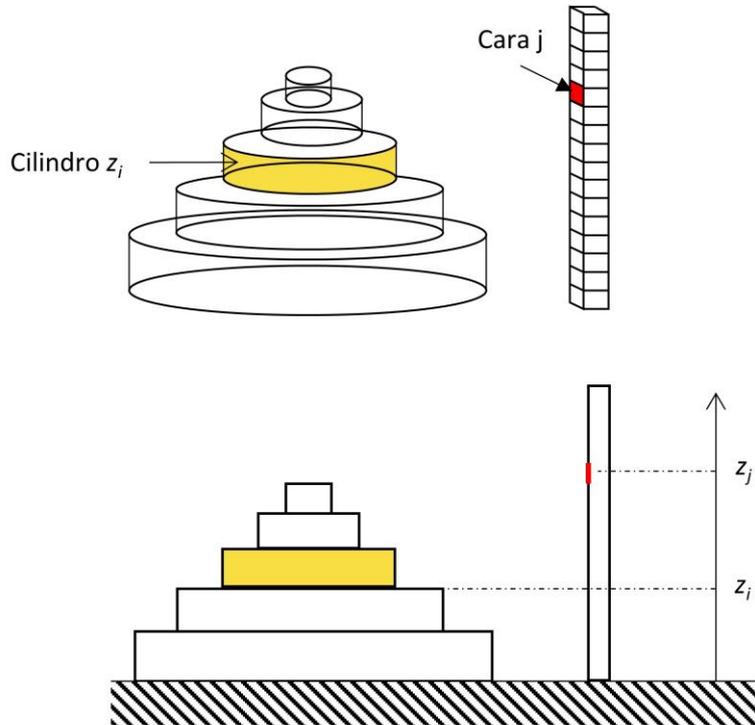


Figura A.5 Intercambio de calor por radiación entre el cilindro z_i y la cara 'face $_j$ '. Vista 3d (arriba), vista lateral (abajo)

Los factores de forma son aditivos^[2]. Por ejemplo, el factor de forma ϕ para el caso mostrado en la Figura A.6 se puede calcular a partir de los factores de forma ϕ_1 y ϕ_2 :

$$\phi_1 = \phi + \phi_2 \Rightarrow \phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (A.8)$$

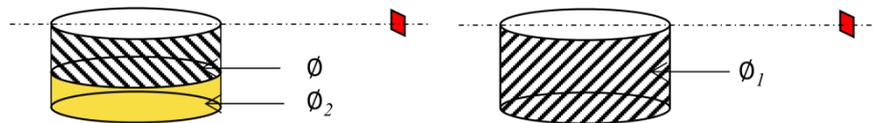


Figura A.6 Regla de adición para los factores de forma

Para poder determinar el factor de forma y, con ello, el flujo de calor para todas las posibles configuraciones, es necesario aplicar reglas adicionales. Por ejemplo, en el caso mostrado en la Figura A.7, la cara 1 ve totalmente al cilindro, las caras 2 y 4 lo ven parcialmente, mientras que a la cara 3 no le llega ningún flujo por radiación desde la llama sólida. Por tanto, la cara 1 corresponde a la situación descrita por la Ecuación (A.6). Para la cara 3, el flujo de calor por radiación incidente es cero. El caso de las caras 2 y 4 es más complejo y la Ecuación (A.6) no puede ser aplicada directamente, pues el plano (de la propia cara) corta al cilindro.



Figura A.7 Ejemplo de interacción cilindro – columna (vista superior)

Puesto que el ángulo que controla el flujo de calor por radiación es principalmente aquél bajo el cual el objetivo ve a la fuente de radiación, la solución adoptada consiste en emplear una forma de la superficie que dé lugar a un factor de forma equivalente. Se puede seguir empleando un cilindro, pero con una geometría modificada según muestra la Figura A.8 y Figura A.9. El diámetro del cilindro se reduce de tal forma que el cilindro modificado sea totalmente visible desde la superficie objetivo y, en consecuencia, la Ecuación (A.6) se puede seguir empleando. Un caso más complejo con varios cilindros se muestra en la Figura A.10, pudiéndose tratar de manera similar.

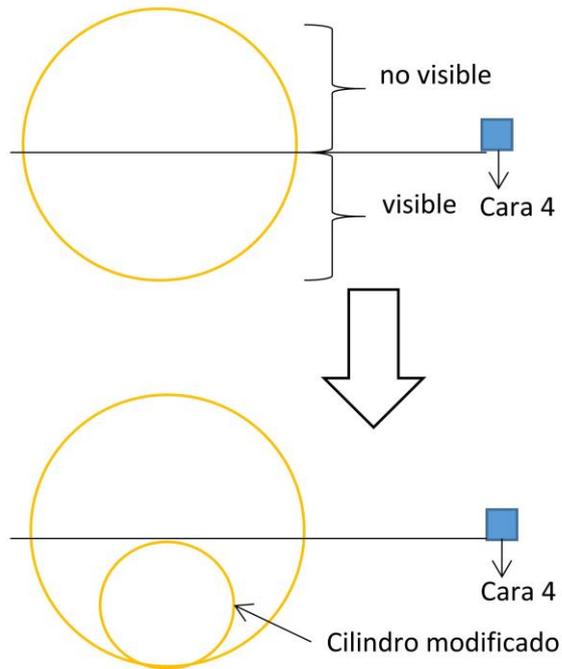


Figura A.8 Modelado del cilindro – vista superior

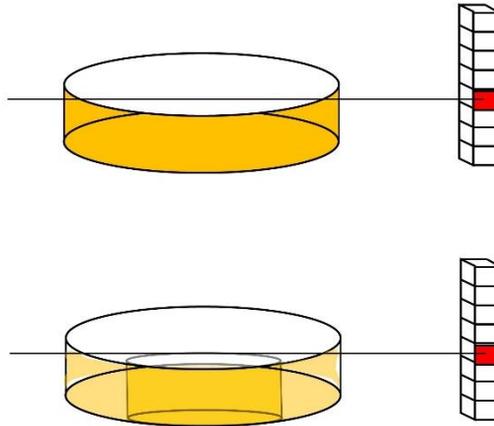


Figura A.9 Modelado del cilindro – Vista 3d



Figura A.10 Caso complejo para el modelado del cilindro

El factor de forma entre un elemento infinitesimal plano y un anillo en el plano perpendicular viene dado por la Ecuación (A.9). Los parámetros geométricos se muestran en la Figura A.11.

$$\phi_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{H}{2} \left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Esta fórmula es válida solo si $l > r_2$

Donde:

$$H = h/l$$

$$R_1 = r_1/l$$

$$R_2 = r_2/l$$

l es la distancia entre la cara y el centro del anillo

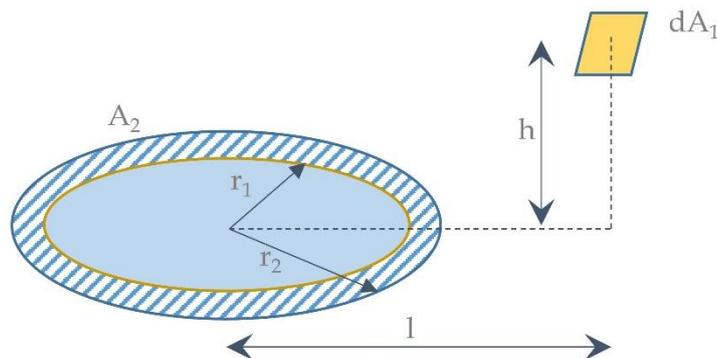


Figura A.11 Configuración anillo – elemento plano

La parte anular (anillo z_i) entre dos cilindros se considera una superficie radiante (véase Figura A.12) y el flujo de calor inducido se calcula mediante la Ecuación (A.9). Ésta únicamente se añade si $z_j > z_i$ (es decir, si la cara “ve” al anillo).

Se deben aplicar reglas adicionales para cubrir todas las configuraciones posibles empleando la Ecuación (A.9). Teóricamente, esta ecuación solo es válida para un anillo centrado en un plano perpendicular al objetivo, lo que no siempre sucede en la práctica (véase Figura A.12)

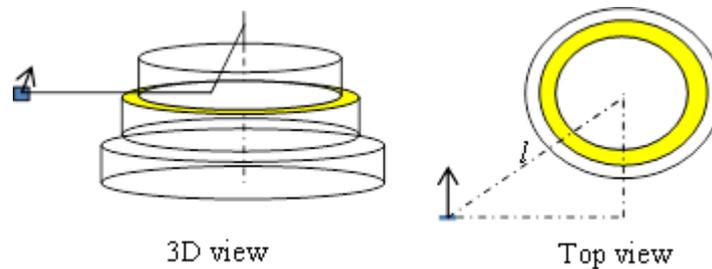


Figura A.12 Modelado del anillo (vista superior)

La orientación del objetivo tiene un fuerte impacto sobre el flujo de calor intercambiado entre dos superficies (Figura A.13). La Ecuación (A.9) corresponde al caso en el que el objetivo es perpendicular al flujo y proporciona por tanto el factor de forma más alto (más conservador).

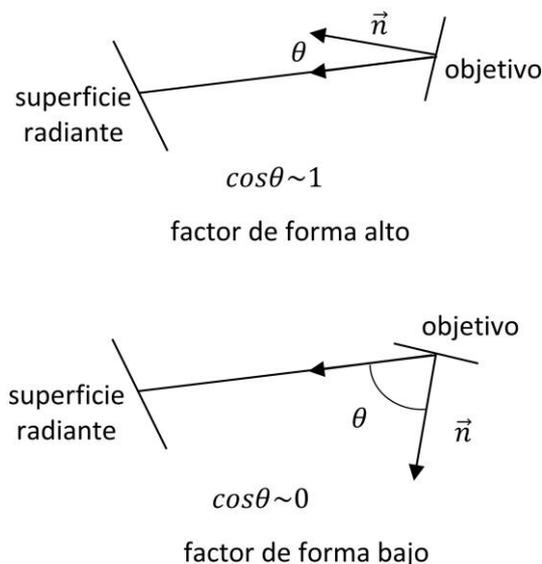


Figura A.13 Influencia de la orientación del objetivo

Es necesario también tener en cuenta la situación en la que el anillo, igual que el cilindro, son parcialmente visibles (véase Figura A.14). En este caso, el radio exterior e incluso el radio interior del anillo se reducen para proporcionar un anillo visible empleando el mismo método aplicado al cilindro. En los ejemplos presentados en la figura se muestran dos casos para un anillo definido por su radio interior r_{zi+1} y su radio exterior r_{zi} . En el caso a), sólo el radio r_{zi} debe ser ajustado, mientras que en el caso b) tanto r_{zi} como r_{zi+1} se deben ajustar.

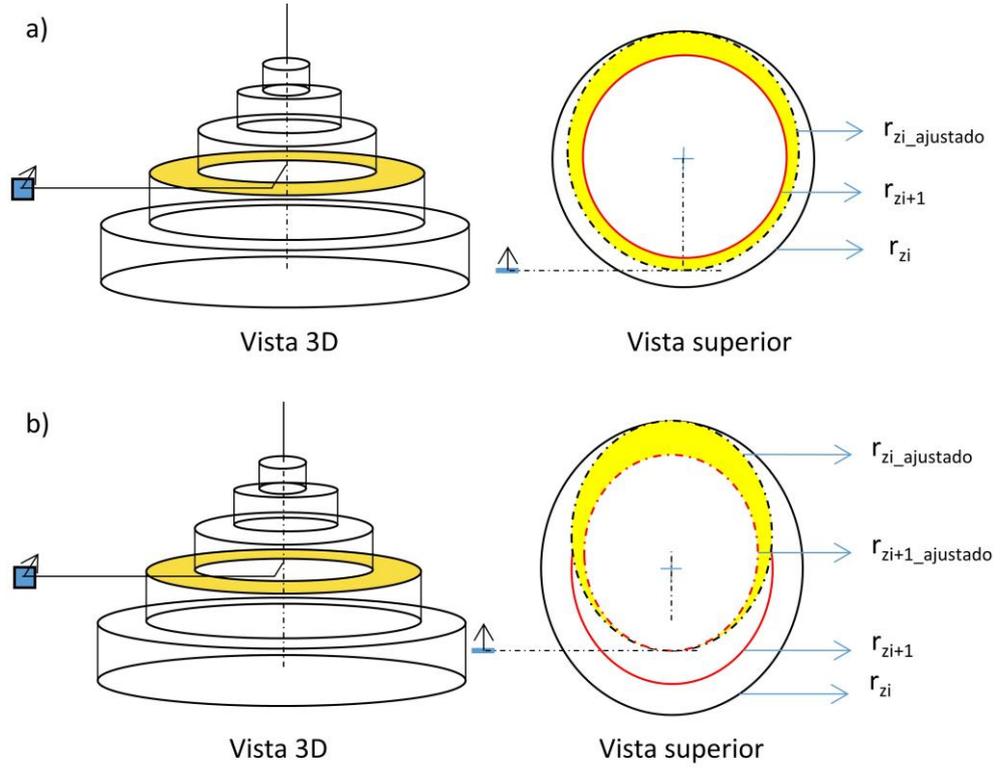


Figura A.14 Manejo de casos complejos en el modelado de los anillos

El flujo de calor por radiación absorbido por una cara es por tanto la suma del flujo por radiación emitido por todos los cilindros y anillos:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_j} = & \sum_i \sigma \cdot \varepsilon \cdot ((\theta_f(z_i) + 273)^4) \cdot \Phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \\ & + \sum_i \sigma \cdot \varepsilon \cdot ((\theta_f(z_i) + 273)^4) \cdot \Phi_{Ring\ z_i \rightarrow face_j} \end{aligned} \quad (A.10)$$

Finalmente, el flujo de calor por radiación promedio que llega a un segmento de la columna situado a una altura z_j se calcula promediando el flujo de calor en las cuatro caras con el ancho l_i de cada una de ellas:

$$\dot{h}_{rad,section\ z_j} = \frac{\sum_{i=1}^4 l_i \cdot \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_i}}{\sum_{i=1}^4 l_i} \quad (A.11)$$

A.2.1.4 Flujo total de calor absorbido por un segmento de la columna

Como se comentó anteriormente, cuando una columna queda fuera de la llama y el segmento considerado no está dentro de la capa de humos, el flujo de calor total recibido es igual al flujo de calor por radiación:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \dot{h}_{rad,section\ z_j} \quad (A.12)$$

A.2.2 Segmento de la columna dentro de la capa caliente

En la capa caliente, el flujo de calor por convección no puede ser despreciado. El humo tiene además un fuerte impacto sobre el flujo de calor por radiación a través del fenómeno de absorción-emisión, principalmente debido al hollín. El flujo de calor total absorbido por un segmento de columna se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Como primer paso, se introduce la variable y :

$$y = \frac{d + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (\text{A.13})$$

Donde:

d es la distancia entre la columna y el centro del área del fuego (Figura 4.2)

H es la distancia entre el fuego y el techo

Si el origen del fuego se localiza a la altura z_{fire} , entonces:

$$H = h_{ceil} - z_{fire} \quad (\text{A.14})$$

L_h viene dado por:

$$L_h = H(2.9Q_h^{0.33} - 1) \quad (\text{A.15})$$

Q_h , un HRR adimensional, se estima como:

$$Q_h = \frac{Q}{1.11 \times 10^6 H^{2.5}} \quad (\text{A.16})$$

z' se define mediante:

$$z' = 2.4D_{eq}(Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1 \quad (\text{A.17})$$

$$z' = 2.4D_{eq}(1 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1 \quad (\text{A.18})$$

Q^* es un HRR adimensional, el cual se estima de manera similar a Q_h :

$$Q^* = \frac{Q}{1.11 \times 10^6 D_{fire}^{2.5}} \quad (\text{A.19})$$

El flujo de calor incidente H_s se calcula entonces en función del valor de y :

$$\begin{cases} H_s = 100000 \text{ W/m}^2 & y \leq 0.3 \\ H_s = 136300 - 121000 \cdot y \text{ W/m}^2 & 0.3 < y < 1.0 \\ H_s = 15000 \cdot y^{-3.7} \text{ W/m}^2 & 1.0 \leq y \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

Finalmente, el flujo de calor total absorbido por el segmento z_j es:

$$\dot{h}_{total,section z_j} = H_s \quad (\text{A.21})$$

A.3 Columnas situadas dentro del área del fuego

Para una columna ubicada dentro del área del fuego, el flujo de calor por convección es el principal componente del flujo de calor total. Además, el concepto de llama sólida donde la superficie externa de la misma irradia hacia la columna deja de ser válido.

El EN 1991-1-2^[2] proporciona un modelo para calcular el flujo de calor recibido en un punto dentro del fuego. El modelo presentado a continuación está basado en las ecuaciones del Eurocódigo, con una pequeña modificación.

De nuevo, si las llamas impactan sobre el techo, se realiza una distinción entre los segmentos de la columna que no están dentro de la capa caliente bajo el techo y los que sí que lo están.

A.3.1 Segmento de la columna fuera de la capa caliente

Los segmentos de la columna situados a una altura z_j entre el suelo y la cota ($h_{ceil} - h_{hot\ layer}$) están rodeados de gases calientes a la temperatura estimada por medio de la Ecuación (A.4). El flujo de calor se calcula entonces como:

$$\dot{h}_{inside\ flame} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left((\theta_f(z_j) + 273)^4 - 293^4 \right) + \alpha_c (\theta_f(z_j) - 20) \quad (A.22)$$

Donde:

α_c es el coeficiente de transmisión de calor por convección = 35 W/(m²K) según el EN 1991-1-2

El flujo de calor total absorbido por el segmento z_j se calcula en este caso como sigue:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \dot{h}_{inside\ flame} \quad (A.23)$$

A.3.2 Segmento de la columna dentro de la capa caliente

Para los segmentos de la columna situados dentro de la capa caliente (entre ($h_{ceil} - h_{hot\ layer}$) y h_{ceil}), el flujo total de calor recibido se toma como el máximo entre H_s calculado mediante el conjunto de Ecuaciones (A.13) a (A.20) y $\dot{h}_{inside\ flame}$ calculado por medio de la Ecuación (A.22).

A.4 Flujo de calor total recibido por un segmento de la columna

El modelo presentado en las Secciones A.2 y A.3 supone que existe un único foco de incendio. Sin embargo, es habitual encontrar escenarios de fuego donde están implicados varios focos. En estos casos, es posible aplicar reglas simples de adición.

Cuando la columna se encuentra fuera del área del fuego y de la capa de humos, el flujo de calor por radiación recibido por cualquier cara de la columna se obtiene como la suma de los flujos de radiación emitidos por cada uno de los focos, suponiendo un límite superior de 100 kW/m².

Si se consideran n focos de incendio:

$$\dot{h}_{all\ solid\ flame \rightarrow face_j} = \min \left(100000, \sum_{i=1}^n \dot{h}_{solid\ flame_i \rightarrow face_j} \right) \quad (A.24)$$

$$\dot{h}_{rad_{section\ z_j}} = \frac{\sum_{i=1}^4 l_i \cdot \dot{h}_{all\ solid\ flame \rightarrow face_i}}{\sum_{i=1}^4 l_i} \quad (A.25)$$

Como se puede observar, el procedimiento para realizar el promedio que permite obtener el flujo de calor total recibido por un segmento de columna no se modifica.

Para todos los demás casos, el flujo total de calor absorbido se estima adicionando todos los flujos de calor de cada uno de los focos de incendio, suponiendo de nuevo un límite superior de 100 kW/m².

ANEXO B APLICACIÓN A UNA COLUMNA FUERA DEL ÁREA DEL FUEGO

Este Anexo proporciona un ejemplo para ilustrar la aplicación práctica del modelo. Nótese que las técnicas descritas en la Sección 4.2 permiten al calculista determinar la evolución de la temperatura en una columna sin necesidad de llevar a cabo el complejo procedimiento numérico aquí descrito.

B.1.1 Descripción del caso a estudiar

Este ejemplo es para una columna situada fuera del área del fuego, sin presencia de techo. Los segmentos de columna dentro de la zona del fuego o fuera de la misma pero dentro de la capa de humos no presentan dificultades especiales, pues el método emplea las ecuaciones clásicas simplificadas existentes en el EN 1991-1-2.

La Figura B.1 presenta la configuración general adoptada. La columna está constituida por un perfil HEB 300. Ésta está situada enfrente de una cubeta de combustible de 4 m de diámetro. La distancia entre el contorno de la cubeta y la cara más cercana del segmento de la columna es de 0.5 m. Dentro de la cubeta, se supone que existe combustible ardiendo a una tasa constante de 1000 kW/m².

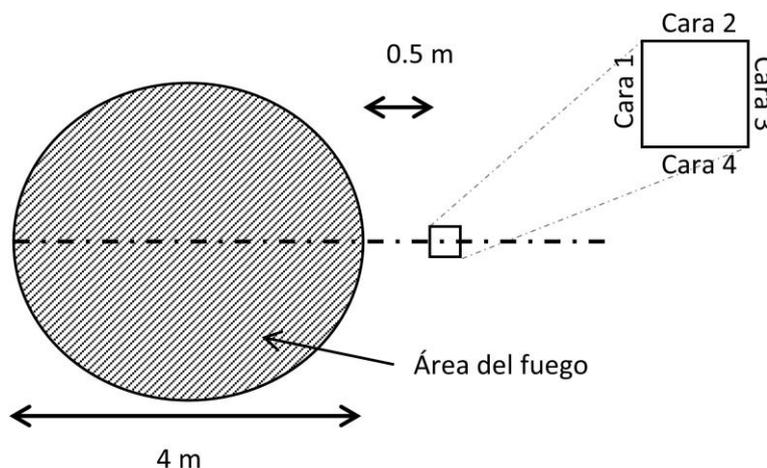


Figura B.1 Posición relativa de la columna y el fuego

B.1.2 Análisis preliminar

El cálculo se puede simplificar de distintas formas. La primera simplificación tiene que ver con el número de segmentos tomados. El número de cálculos necesarios es proporcional al número de segmentos. La Ecuación (A.6) se simplifica enormemente si los segmentos se encuentran a cotas que sean múltiplo de la altura del cilindro empleado para modelar la llama (0.5 m). En este caso, la variable y es igual a 0 (véase Figura B.2) y la Ecuación (A.6) se reduce a:

$$\phi_{d_{A_1 \rightarrow A_2}}(s, x, r, h) = \frac{S}{A} - \frac{S}{2A\pi} \{\pi + L_1 - L_2 + L_3\} \quad (\text{B.1})$$

$$L_1 = \cos^{-1} \left(\frac{H^2 - A + 1}{H^2 + A - 1} \right)$$

$$L_2 = H \frac{H^2 + A + 1}{\sqrt{(H^2 + A - 1)^2 + 4H^2}} \cos^{-1} \left(\frac{H^2 - A + 1}{\sqrt{A}(H^2 + A - 1)} \right)$$

$$L_3 = H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{A}} \right)$$

Donde:

$$S = \frac{s}{r} \quad X = \frac{x}{r} \quad H = \frac{h}{r} \quad A = X^2 + S^2 \quad (\text{B.2})$$

En consecuencia, los cálculos se llevan a cabo para segmentos situados a cota 0 m, 0.5 m, 1.0 m y sucesivas. En los siguientes párrafos, el flujo de calor se calcula para un segmento situado a la altura de 1.0 m.

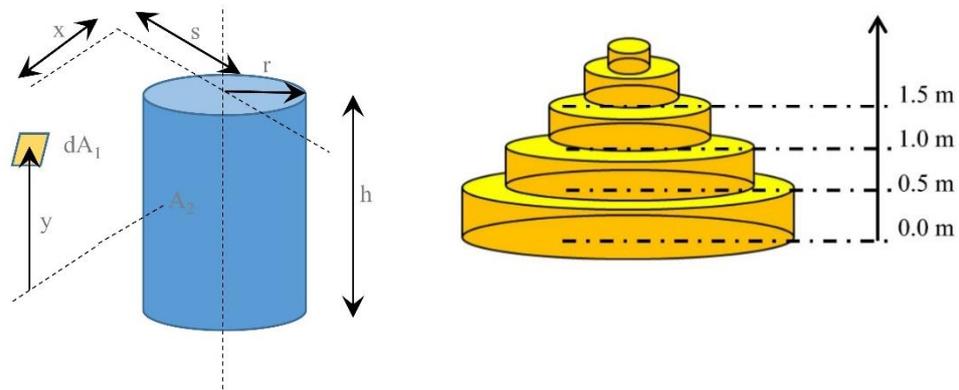


Figura B.2 Configuración cilindro-elemento plano (izquierda) – altura de los segmentos para los cálculos (derecha)

En segundo lugar, se asume que con esta configuración no llega ningún flujo de calor por radiación desde la llama a la cara 3. Las caras 2 y 4 son simétricas y reciben por tanto el mismo flujo.

La simplificación final tiene que ver con la posición del punto de cálculo del flujo de calor para las caras. Aunque esto se debería hacer en el centro de cada cara (véase Figura B.3), los cálculos se llevan a cabo de manera simplificada tomando la misma posición del centro de la cara 1. Puesto que ésta es la cara más cercana a la cubeta, esta simplificación dará lugar a un flujo de calor mayor, siendo por tanto una hipótesis conservadora.

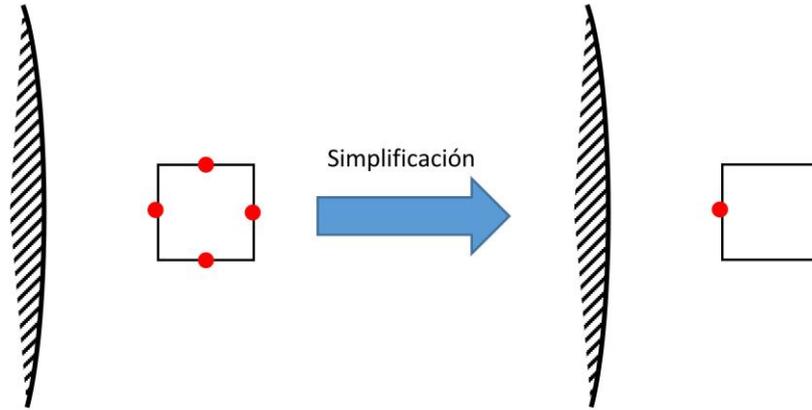


Figura B.3 Simplificación para la posición de cada cara en el cálculo del flujo de calor

B.1.3 Cálculo del flujo de calor

Mediante las Ecuaciones (A.2) a (A.5), es posible determinar las propiedades de cada cilindro y anillo. En este caso la altura de la llama es de 6.15 m (véase Figura B.9). El flujo de calor recibido por cada cara se determina de forma separada.

Para la cara 1, se puede emplear la Ecuación (B.1) para calcular el factor de forma entre la cara 1 y los cilindros. Sin embargo, se debe de usar la regla de adición dependiendo de la altura relativa entre cada cilindro y la cara.

Considerando la posición ilustrada en la Figura B.4 para la cara 1 y el cilindro C_i (comprendido entre z_i y z_{i+1}), la posición de un determinado segmento en el sistema de referencia local $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ se puede tomar como (s_f, x_f, z_f) que para este caso es $(2.5, 0.0, 1.0)$. Se pueden dar las cuatro situaciones indicadas en la Figura B.5, las cuales han de ser descompuestas según se muestra en la misma Figura.

Si se define ϕ_i (respectivamente ϕ_{i+1}), como el factor de forma entre la cara 1 y un cilindro de altura $|z_i - z_f|$ (respectivamente $|z_{i+1} - z_f|$) y radio r_i :

$$\phi_i = \phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_i - z_f|) \quad (\text{B.3})$$

$$\phi_{i+1} = \phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_{i+1} - z_f|)$$

Entonces el factor de forma ϕ entre la cara 1 y el cilindro C_i es igual a:

$$\phi = |\phi_i - \phi_{i+1}| \quad (\text{B.4})$$

La última parte tiene que ver con el flujo inducido por los anillos. Puesto que el segmento se encuentra a una altura de 1.0 m, solo existe un anillo (a 0.5 m) por debajo del segmento. Empleando la Ecuación (A.3), los radios (externo e interno) del anillo pueden ser calculados como sigue:

$$r(z_i = 0.0) = 2.00 \text{ m} \quad (\text{B.5})$$

$$r(z_{i+1} = 0.5) = 1.84 \text{ m}$$

El flujo de calor incidente se calcula finalmente sumando todas las contribuciones (Ecuación (A.9)). Esto da lugar a un flujo de calor incidente sobre la cara 1 de 76.36 kW/m^2 y, suponiendo una emisividad de 0.7, a un flujo de calor absorbido de 53.45 kW/m^2 .

La Figura B.9 muestra la implementación del procedimiento descrito en una hoja Excel para el ejemplo estudiado.

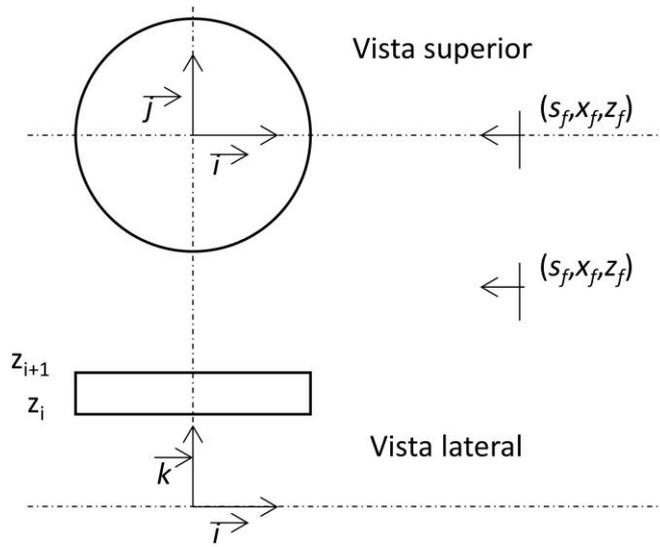


Figura B.4 Coordenadas de la cara 1

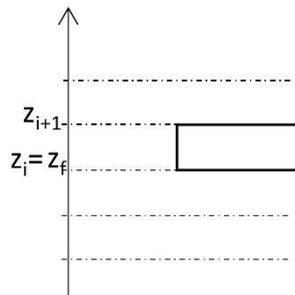


Figura B.5 Posición relativa de la cara 1: cilindros y descomposición, Caso a

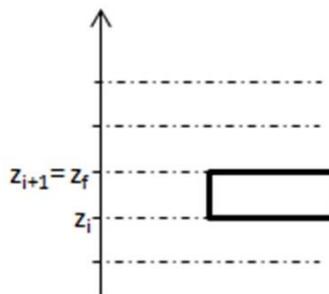


Figura B.6 Posición relativa de la cara 1: cilindros y descomposición, Caso b

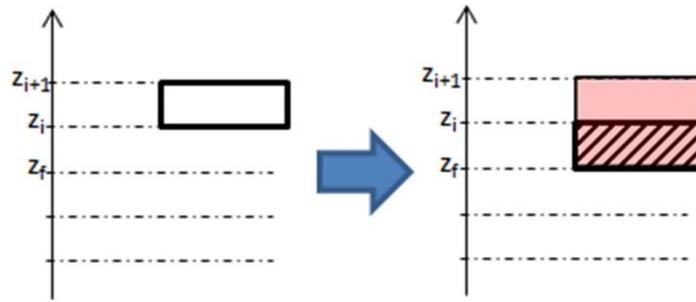


Figura B.7 Posición relativa de la cara 1: cilindros y descomposición, Caso c

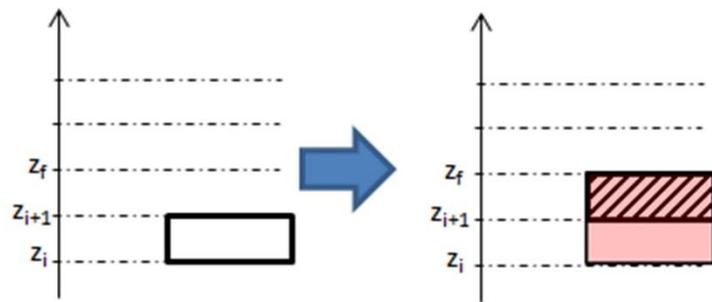


Figura B.8 Posición relativa de la cara 1: cilindros y descomposición, Caso d

Input data					Constant		Section coordinate			Intermediate variables	
HRR	Dfire	Q	Q	hf	σ	Tab _s	sf	xf	zf	z_{virt}	l
kW/m ²	m	W	MW	m			m	m	m		
1000	4	12566370.6	12.57	6.15	5.67E-08	273.15	2.5	0	1	-0.46	2.5

zi	Tf	ri	F _{cylinder_zi}	F _{ring_zi}	Flux _{face1}	Cylinder								Ring		
						Fi	Fi+1	S	X	A	Hi	Hi+1	zi-zf	zi+1-zf	H	Ri
m	°C	m	-	-	kW/m ²	-	-	-	-	-	-	-	m	m	-	-
0	900	2.00	0.0726	0	7.79	0.3705	0.2979	1.25	0	1.56	0.50	0.25	1.00	0.50	0	0.00
0.5	900	1.84	0.2374	0.0555	31.45	0.2374	0.0000	1.36	0	1.85	0.27	0.00	0.50	0.00	0.20	0.80
1	900	1.67	0.1893	0	20.33	0.0000	0.1893	1.49	0	2.23	0.00	0.30	0.00	0.50	0	0.73
1.5	900	1.51	0.0823	0	8.84	0.1514	0.2337	1.65	0	2.73	0.33	0.66	0.50	1.00	0	0.67
2	900	1.35	0.0361	0	3.88	0.1953	0.2315	1.85	0	3.43	0.74	1.11	1.00	1.50	0	0.60
2.5	900	1.19	0.0177	0	1.91	0.1958	0.2136	2.11	0	4.43	1.26	1.68	1.50	2.00	0	0.54
3	900	1.02	0.0095	0	1.02	0.1797	0.1893	2.44	0	5.95	1.95	2.44	2.00	2.50	0	0.47
3.5	900	0.86	0.0054	0	0.58	0.1564	0.1618	2.90	0	8.41	2.90	3.48	2.50	3.00	0	0.41
4	900	0.70	0.0031	0	0.34	0.1296	0.1328	3.57	0	12.77	4.29	5.00	3.00	3.50	0	0.34
4.5	828	0.54	0.0018	0	0.15	0.1009	0.1027	4.66	0	21.68	6.52	7.45	3.50	4.00	0	0.28
5	708	0.37	0.0010	0	0.05	0.0711	0.0720	6.68	0	44.58	10.68	12.02	4.00	4.50	0	0.21
5.5	615	0.21	0.0004	0	0.02	0.0405	0.0409	11.80	0	139.24	21.24	23.60	4.50	5.00	0	0.15
6	540	0.05	0.0001	0	0.00	0.0095	0.0096	50.71	0	2571.11	101.41	111.55	5.00	5.50	0	0.08
6.5	479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.50	6.00	0	0.02
7	429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	6.50	0	0
7.5	387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.50	1.00	0	0

						Incident heat flux on face 1	76.36	kW/m ²								
						Absorbed heat flux on face 1	53.45	kW/m ²								

Figura B.9 Ejemplo de hoja de cálculo para obtener el flujo de calor incidente en la cara 1

Para la cara 2 (y cara 4), no es posible emplear la Ecuación (A.9) directamente, pues algunas partes de la llama no son visibles. En el caso de la cara 2 y el cilindro C_i (comprendido entre z_i y z_{i+1}), la posición de la cara 2 se define en el sistema de referencia local $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ como (s_f, x_f, z_f) (Figura B.10). Como ya se comentó en la Sección anterior, se ajusta el cilindro C_i y se introducen los puntos adicionales A, B y C. La parte más compleja del cálculo es la caracterización de este cilindro ajustado.

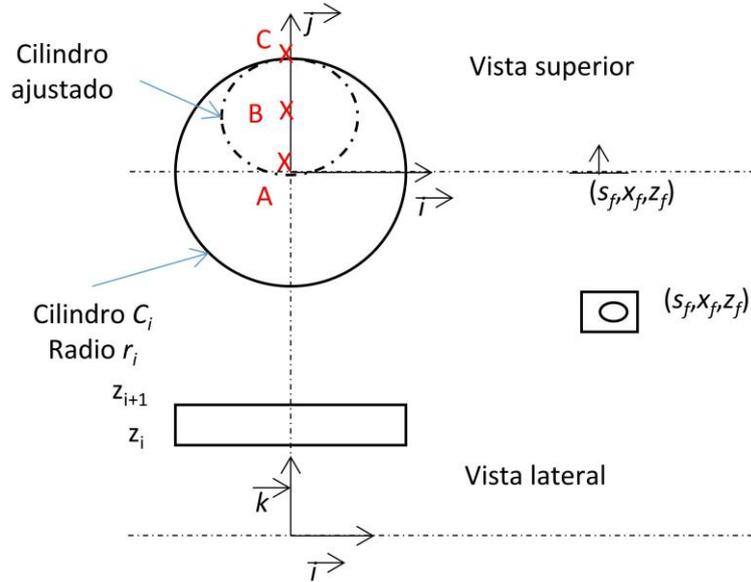


Figura B.10 Coordenadas de la cara 2

El Punto A corresponde al punto con coordenada 'y' mínima r_{min} para el cilindro ajustado:

$$r_{min} = \max(-r_i, x_f) \quad (B.6)$$

El Punto C corresponde al punto con coordenada 'y' máxima r_{max} para el cilindro ajustado:

$$r_{max} = r_i \quad (B.7)$$

El Punto B corresponde al centro del cilindro ajustado:

$$y_{centre} = \frac{r_{min} + r_{max}}{2} \quad (B.8)$$

El radio del cilindro ajustado es:

$$r_{adjusted} = \frac{r_{max} - r_{min}}{2} \quad (B.9)$$

Estas operaciones permiten determinar los parámetros que se emplean en la Ecuación (B.1) para el cilindro ajustado.

Para el cilindro C_0 situado entre 0 m y 0.5 m, el radio inicial es de 2 m, luego:

$$\begin{aligned}
r_{min} &= \max(-2.0) = 0 \text{ m} \\
r_{max} &= 2 \text{ m} \\
y_{centre} &= \frac{0 + 2}{2} = 1 \text{ m} \\
r_{adjusted} &= \frac{2 - 0}{2} = 1 \text{ m}
\end{aligned} \tag{B.10}$$

Se debe emplear ahora la regla de adición dependiendo de la altura relativa entre la cara 2 y el cilindro modificado, igual que se hizo para la cara 1:

$$\begin{aligned}
\Phi_i &= \Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} \left(\begin{array}{l} S = y_{centre} - x_f \\ x = S_f \\ r = r_{adjusted} \\ h = |z_i - z_f| \end{array} \right) \\
\Phi_{i+1} &= \Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} \left(\begin{array}{l} S = y_{centre} - x_f \\ x = S_f \\ r = r_{adjusted} \\ h = |z_{i+1} - z_f| \end{array} \right)
\end{aligned} \tag{B.11}$$

Con ello, el factor de forma Φ entre la cara 2 y el cilindro ajustado resulta igual a:

$$\Phi = |\Phi_{i+1} - \Phi_i| \tag{B.12}$$

El flujo de calor por radiación emitido por los anillos se limita de nuevo únicamente a considerar el anillo de cota 0.5 m y de manera más exacta al anillo ajustado definido por sus radios interior y exterior. Éstos corresponden a los radios del cilindro ajustado calculados previamente para el radio exterior (1 m). Para el radio interior, el valor inicial de 1.84 m (véase el valor de r_i a $z_i = 0.5$ m en la Figura B.11) se reduce a 0.92 m.

El flujo de calor incidente sobre la cara 2 se obtiene entonces como la suma de todas las contribuciones de la llama sólida ajustada, igual a 8.57 kW/m² y considerando una emisividad de 0.7 para la columna, el flujo de calor por radiación absorbido resulta 6 kW/m². La Figura B.11 muestra un ejemplo de la implementación en una hoja Excel para este caso.

En consecuencia, el flujo de calor por radiación absorbido por cada cara es:

$$\begin{aligned}
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_1} &= 53.45 \text{ kW/m}^2 \\
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_2} &= 6.00 \text{ kW/m}^2 \\
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_3} &= 0 \text{ kW/m}^2 \\
\dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_4} &= 6.00 \text{ kW/m}^2
\end{aligned} \tag{B.13}$$

Puesto que la anchura de cada cara del perfil HEB 300 es de 0.3 m, el flujo de calor total recibido por un segmento de columna situado a una altura de 1.0 m será de:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \frac{53.45 + 6.00 + 0 + 6.00}{4} = 16.36 \text{ kW/m}^2 \tag{B.14}$$

zi	Tf	ri	F _{cylinder_zi}	F _{ring_zi}	Flux _{face2}	Ring		
m	°C	m	-	-	kW/m ²	H	Ri	Ri+1
0	900	2.00	0.0175	0	1.88	0	0.00	0.00
0.5	900	1.84	0.0193	0.0060	2.71	0.20	0.40	0.37
1	900	1.67	0.0160	0	1.72	0	0.37	0.33
1.5	900	1.51	0.0103	0	1.10	0	0.33	0.30
2	900	1.35	0.0056	0	0.60	0	0.30	0.27
2.5	900	1.19	0.0028	0	0.30	0	0.27	0.24
3	900	1.02	0.0014	0	0.15	0	0.24	0.20
3.5	900	0.86	0.0006	0	0.07	0	0.20	0.17
4	900	0.70	0.0003	0	0.03	0	0.17	0.14
4.5	828	0.54	0.0001	0	0.01	0	0.14	0.11
5	708	0.37	0.0000	0	0.00	0	0.11	0.07
5.5	615	0.21	0.0000	0	0.00	0	0.07	0.04
6	540	0.05	0.0000	0	0.00	0	0.04	0.01
6.5	479	0	0	0	0	0	0.01	0.00
7	429	0	0	0	0	0	0	0
7.5	387	0	0	0	0	0	0	0
Incident heat flux on face 2					8.57	kW/m ²		
Absorbed heat flux by face 2					6.00	kW/m ²		

Input data				
HRR	Dfire	Q	Q	hf
kW/m ²	m	W	MW	m
1000	4	12566370.6	12.57	6.15

Section coordinate		
sf	xf	zf
m	m	m
2.5	0	1

Constant		Intermediate variables	
σ	Tabs	z _{virt}	l
5.67E-08	273.15	-0.46	2.5

Modified cylinder / ring				Cylinder									
rmin	rmax	ri_adjusted	ycenter	Fi	Fi+1	s	S	X	A	Hi	Hi+1	z _i -z _i 1	z _{i+1} -z _i 1
m	m	m	m	-	-	-	-	-	-	-	-	m	m
0	2.00	1.00	1.00	0.0403	0.0229	1.00	1.00	2.50	7.25	1.00	0.50	1.00	0.50
0	1.84	0.92	0.92	0.0193	0.0000	0.92	1.00	2.72	8.40	0.54	0.00	0.50	0.00
0	1.67	0.84	0.84	0.0000	0.0160	0.84	1.00	2.99	9.91	0.00	0.60	0.00	0.50
0	1.51	0.76	0.76	0.0130	0.0233	0.76	1.00	3.31	11.93	0.66	1.32	0.50	1.00
0	1.35	0.67	0.67	0.0185	0.0241	0.67	1.00	3.70	14.72	1.48	2.22	1.00	1.50
0	1.19	0.59	0.59	0.0187	0.0215	0.59	1.00	4.21	18.74	2.53	3.37	1.50	2.00
0	1.02	0.51	0.51	0.0161	0.0174	0.51	1.00	4.88	24.81	3.90	4.88	2.00	2.50
0	0.86	0.43	0.43	0.0124	0.0130	0.43	1.00	5.80	34.64	5.80	6.96	2.50	3.00
0	0.70	0.35	0.35	0.0086	0.0089	0.35	1.00	7.15	52.09	8.58	10.01	3.00	3.50
0	0.54	0.27	0.27	0.0053	0.0054	0.27	1.00	9.31	87.70	13.04	14.90	3.50	4.00
0	0.37	0.19	0.19	0.0026	0.0027	0.19	1.00	13.35	179.33	21.37	24.04	4.00	4.50
0	0.21	0.11	0.11	0.0009	0.0009	0.11	1.00	23.60	557.97	42.48	47.20	4.50	5.00
0	0.05	0.02	0.02	0.0000	0.0000	0.02	1.00	101.41	10285.43	202.82	223.11	5.00	5.50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.50	6.00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	6.50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.50	1.00

Figura B.11 Ejemplo de hoja de cálculo para obtener el flujo de calor incidente en la cara 2

ANEXO C MAPAS DE CONTORNO

La Tabla C.1 muestra un resumen de los mapas de contorno proporcionados en este Anexo.

Tabla C.1 Resumen de los mapas de contorno

Figura Número	D (m)	HRR (kW/m ²)		Página
		(kW/m ²)	(MW)	
C.1	2	250	0.8	57
C.2	2	500	1.6	58
C.3	2	1000	3.1	59
C.4	2	1500	4.7	60
C.5	3	250	1.8	61
C.6	3	500	3.5	62
C.7	3	1000	7.1	63
C.8	3	1500	10.6	64
C.9	4	250	3.1	65
C.10	4	500	6.3	66
C.11	4	1000	12.6	67
C.12	4	1500	18.8	68
C.13	6	250	7.1	69
C.14	6	500	14.1	70
C.15	6	1000	28.3	71
C.16	6	1500	42.4	72
C.17	8	250	12.6	73
C.18	8	500	25.1	74
C.19	8	1000	50.3	75
C.20	9	250	15.9	76
C.21	9	500	31.8	77
C.22	9	750	47.7	78
C.23	10	250	19.6	79
C.24	10	500	39.3	80

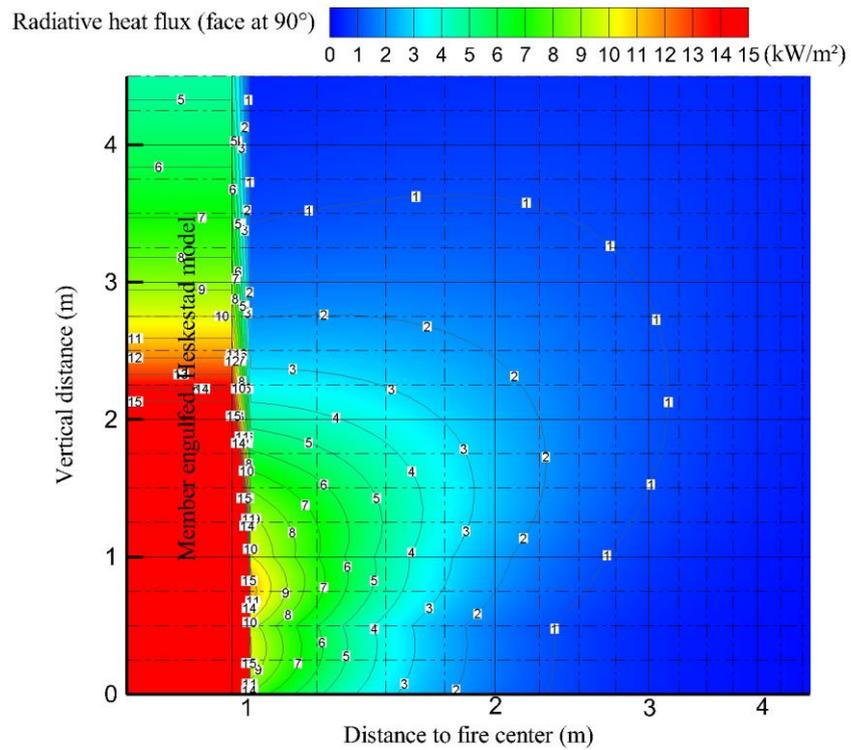
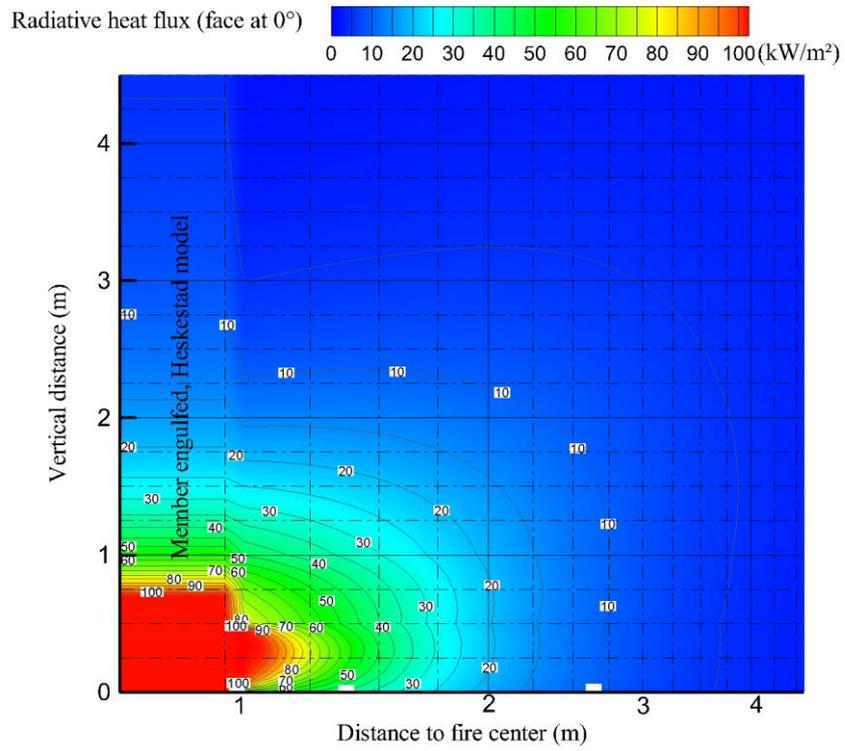


Figura C.1 Mapa de contorno para $D = 2 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

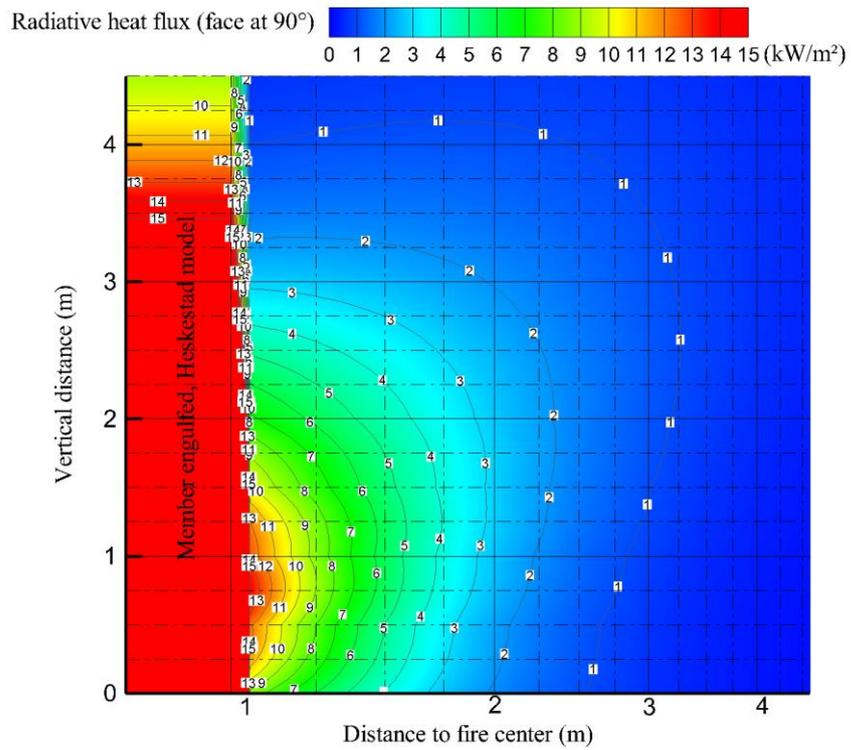
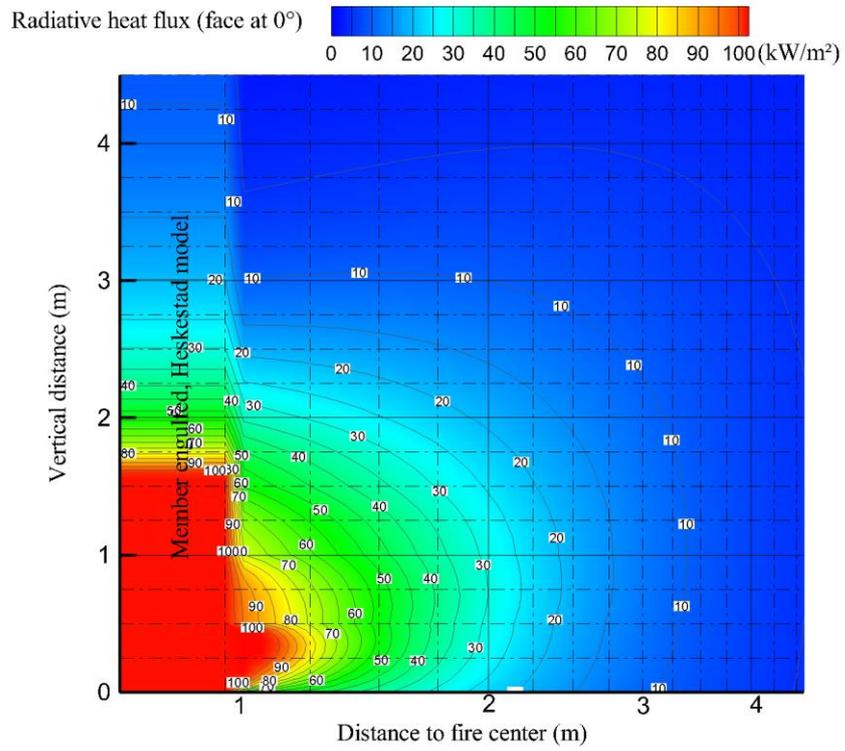


Figura C.2 Mapa de contorno para $D = 2 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

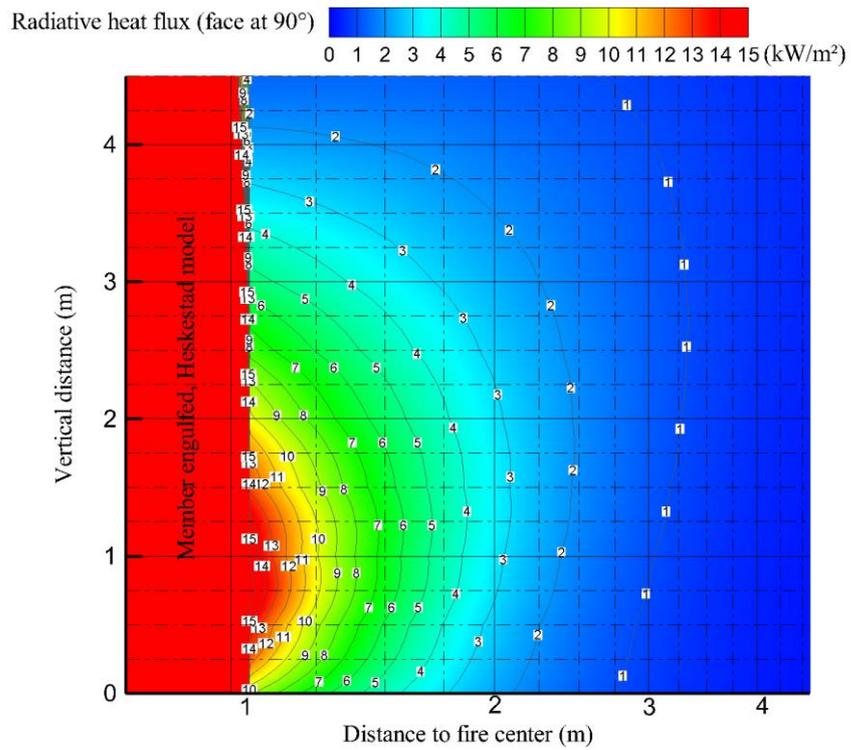
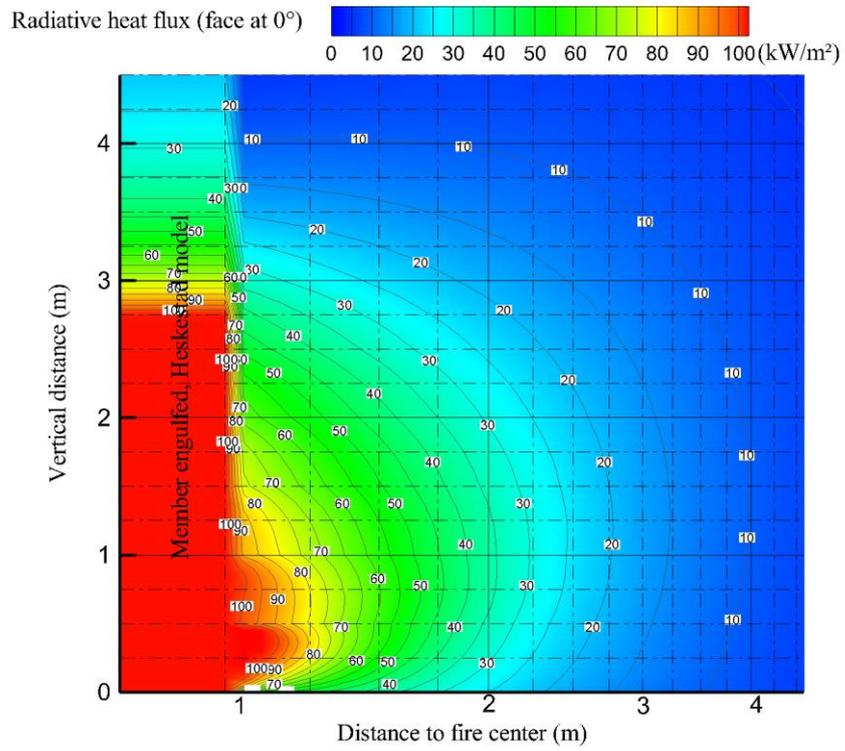


Figura C.3 Mapa de contorno para $D = 2 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

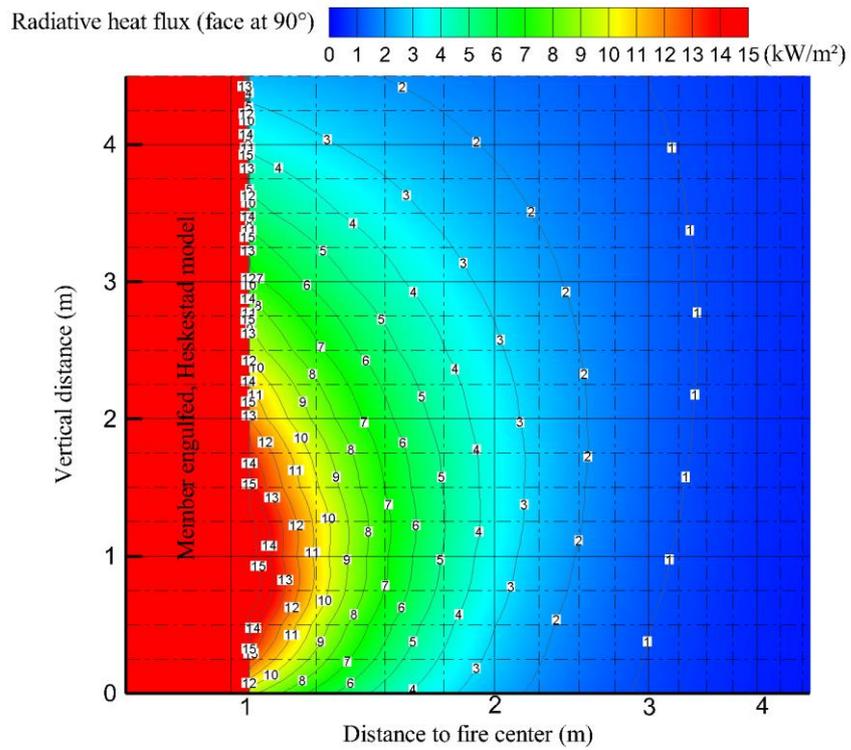
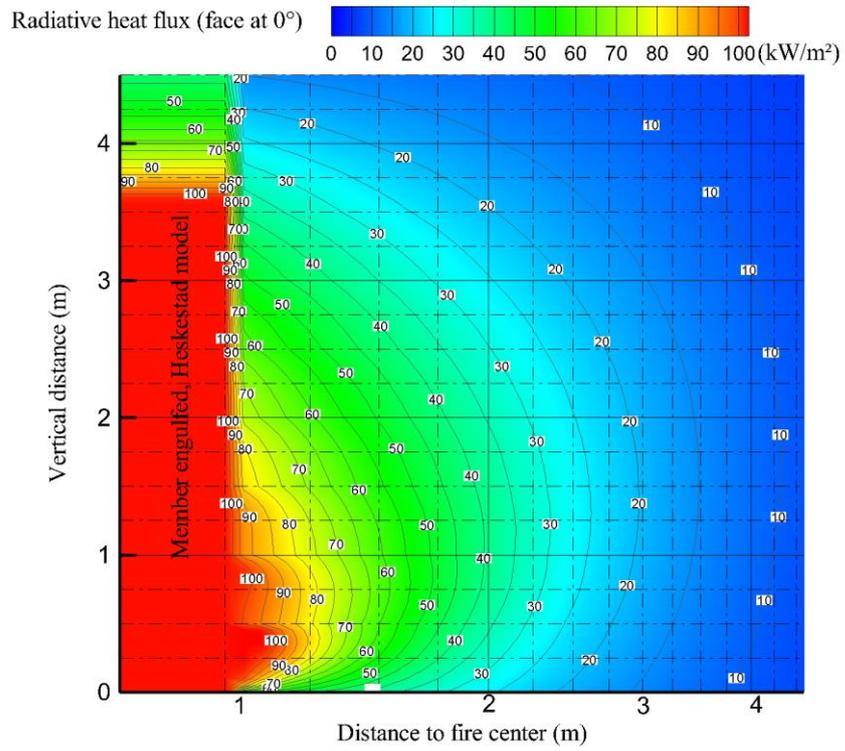


Figura C.4 Mapa de contorno para $D = 2 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

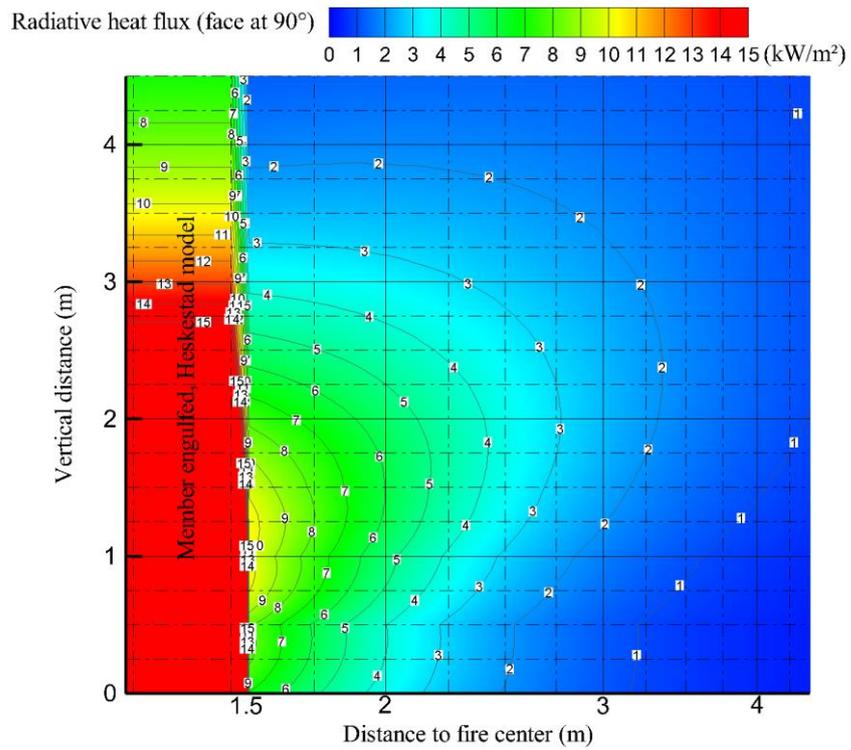
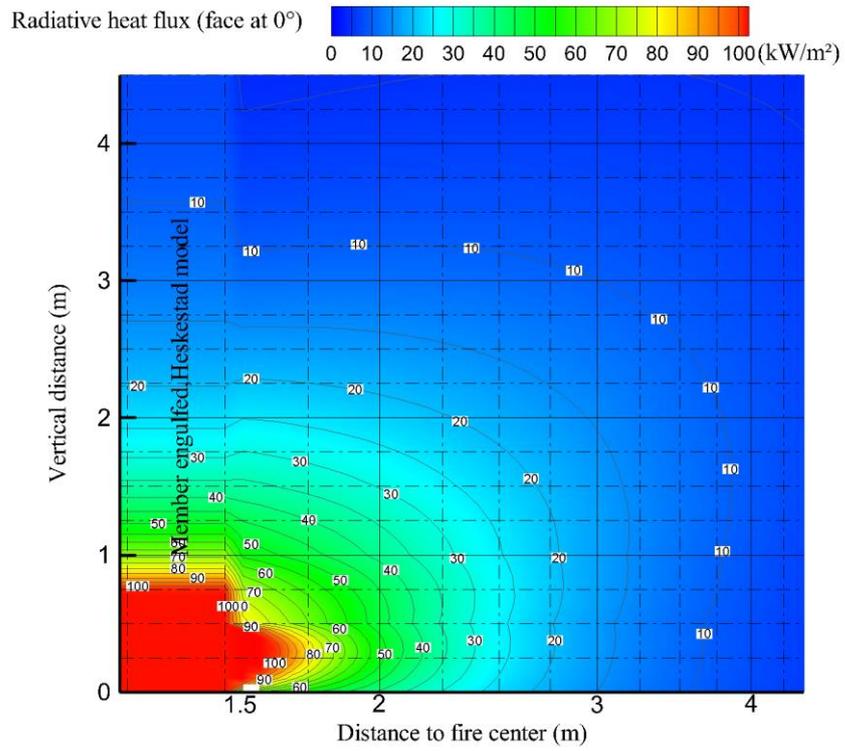


Figura C.5 Mapa de contorno para $D = 3 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

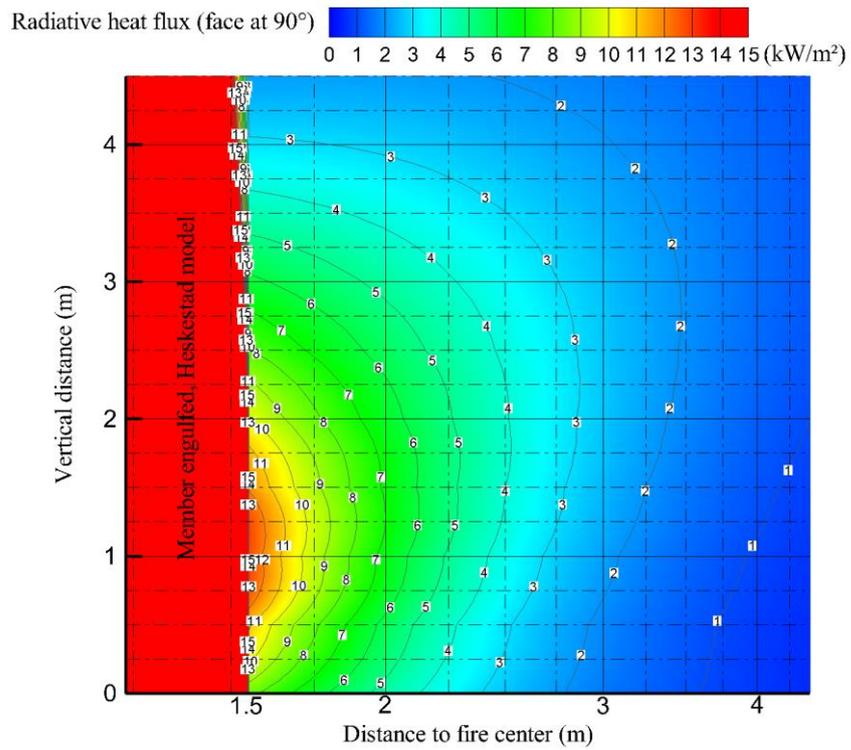
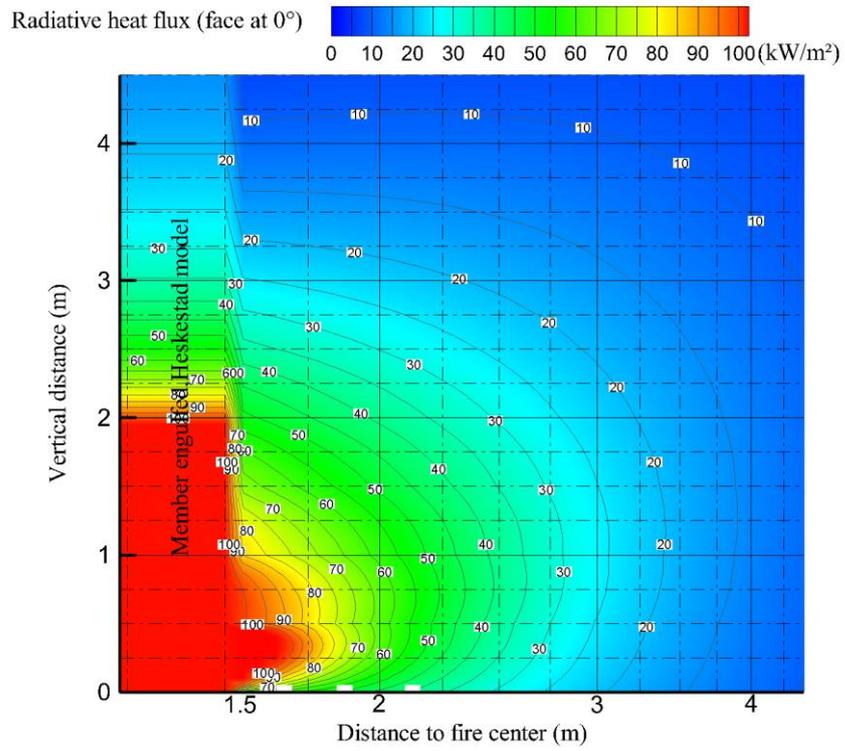


Figura C.6 Mapa de contorno para $D = 3 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

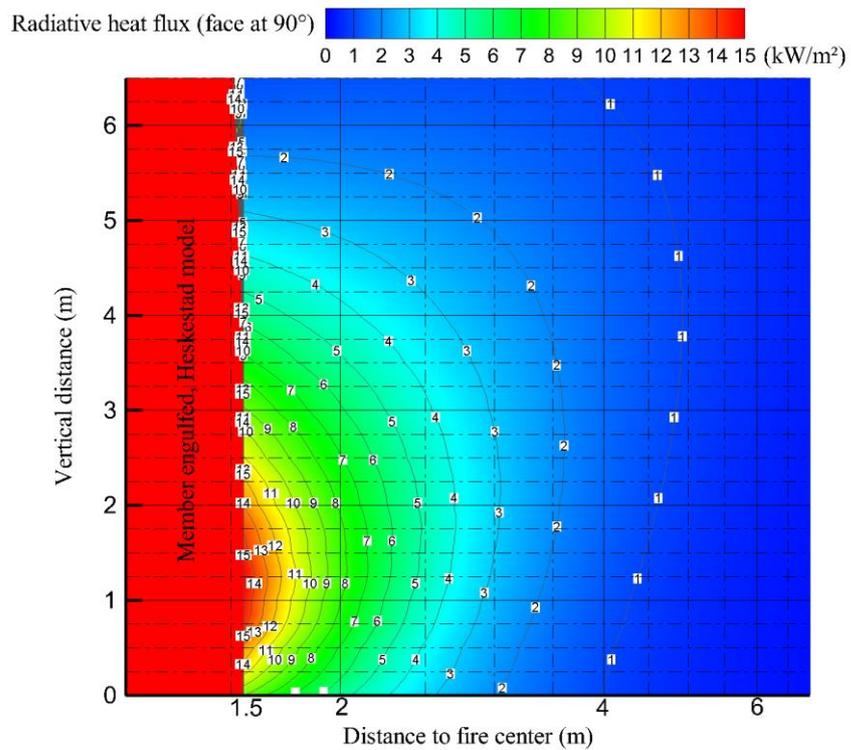
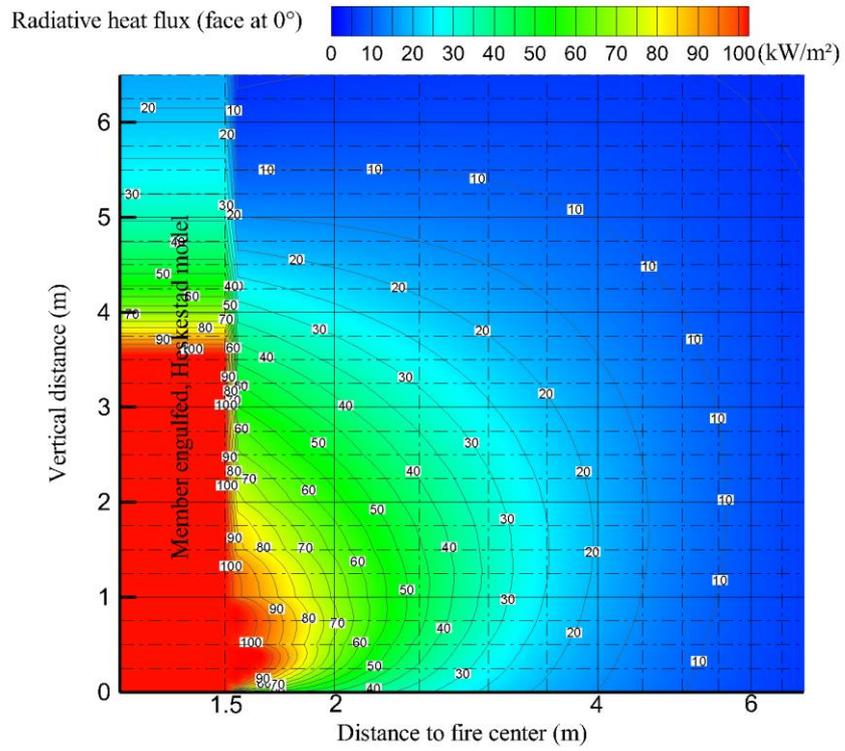


Figura C.7 Mapa de contorno para $D = 3 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

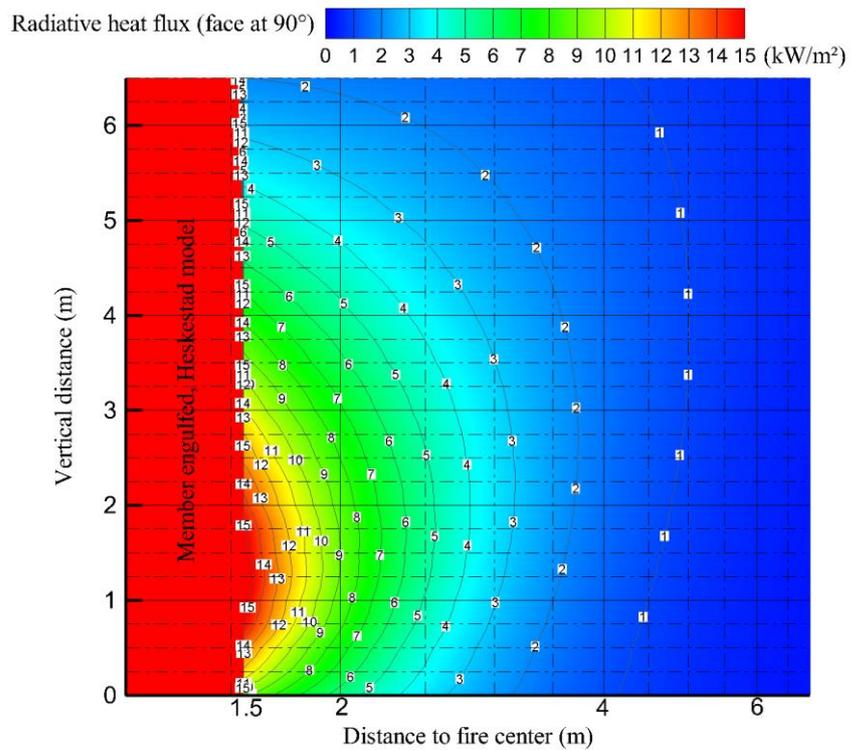
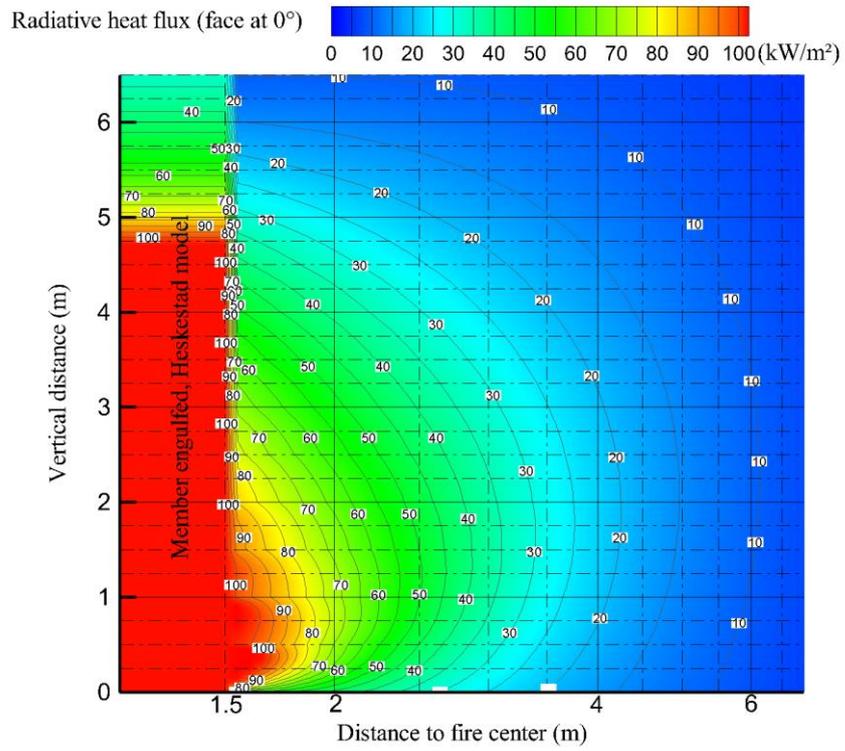


Figura C.8 Mapa de contorno para $D = 3 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

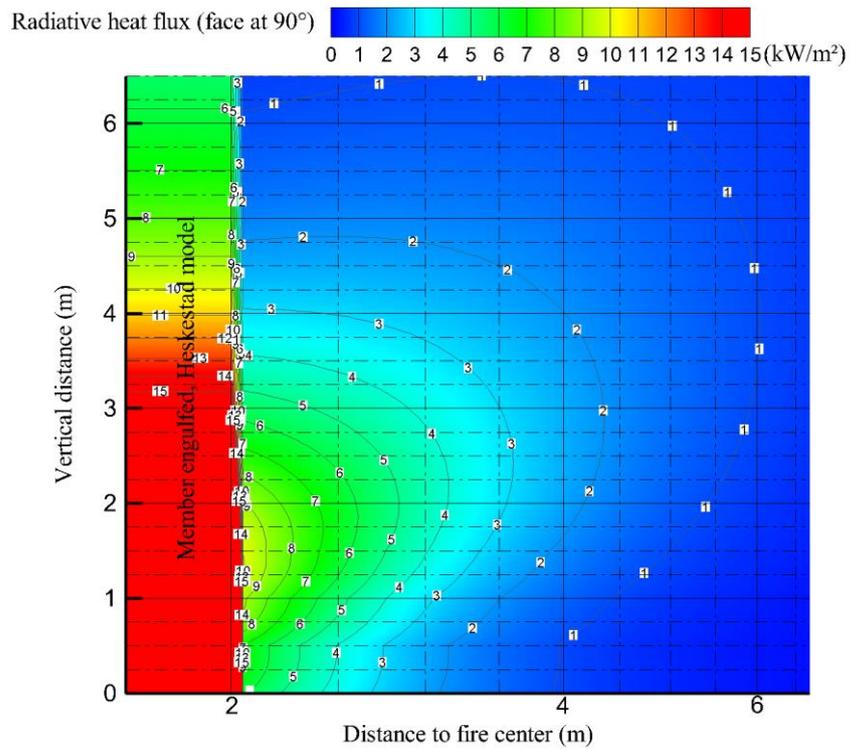
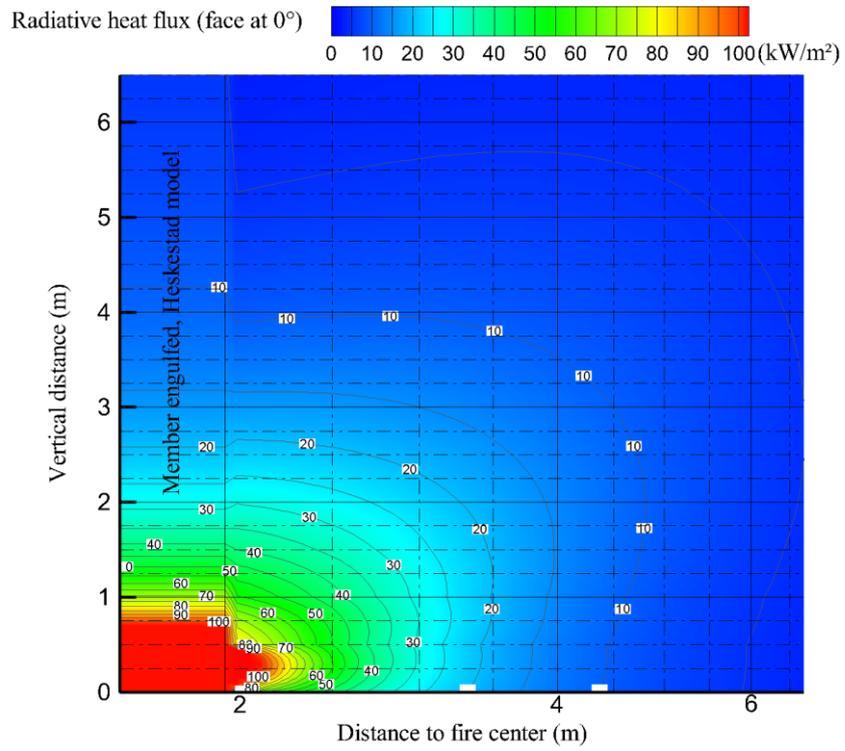


Figura C.9 Mapa de contorno para $D = 4 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

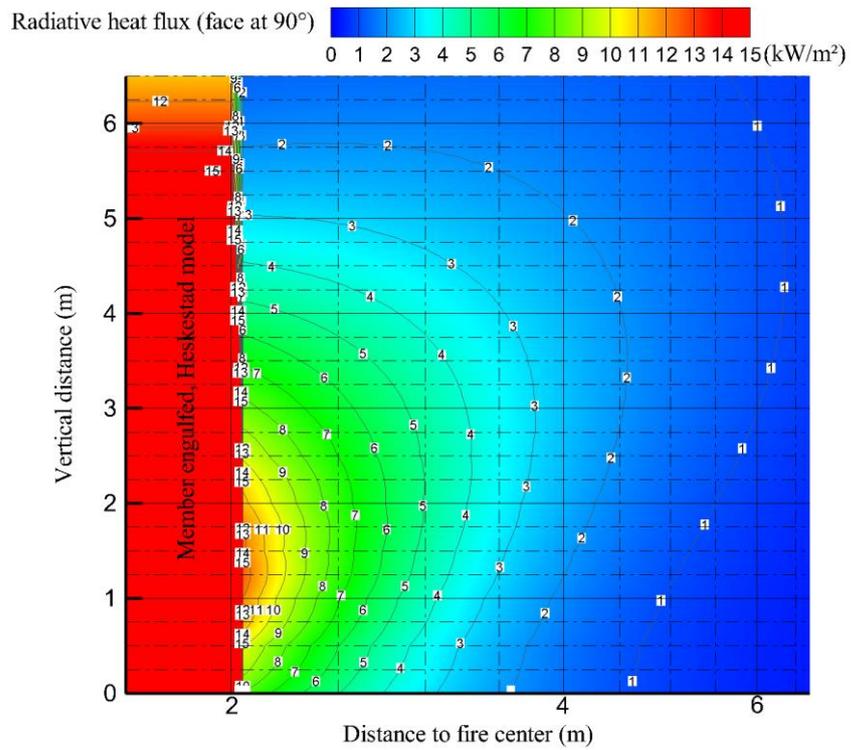
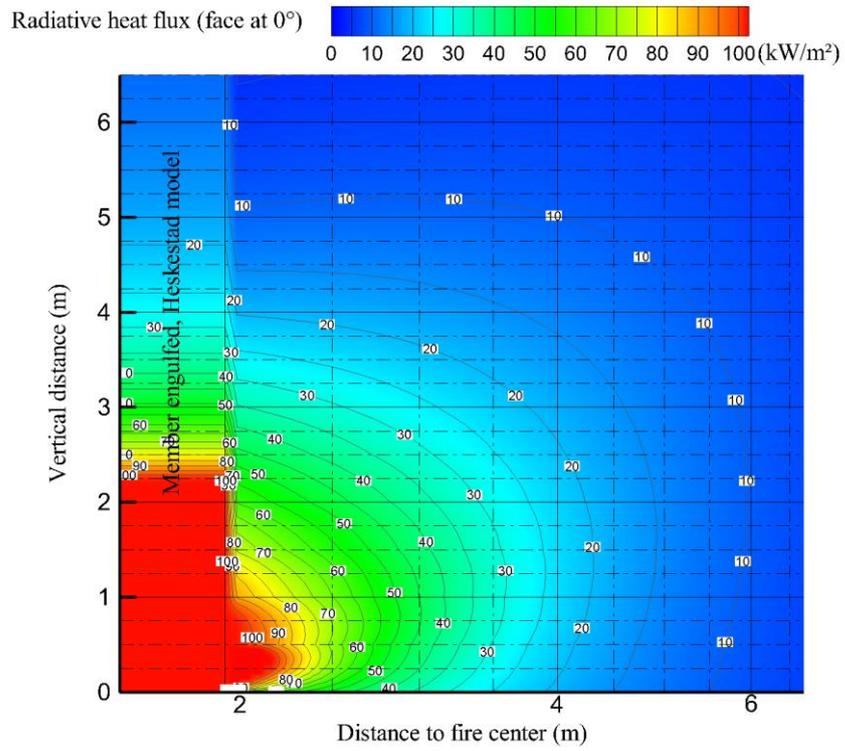


Figura C.10 Mapa de contorno para $D = 4 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

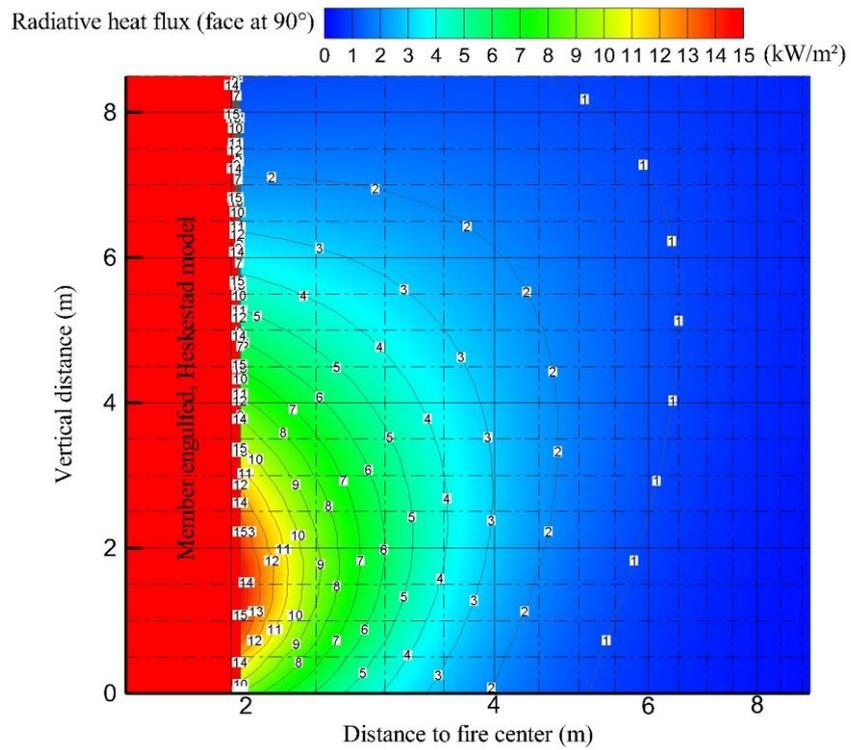
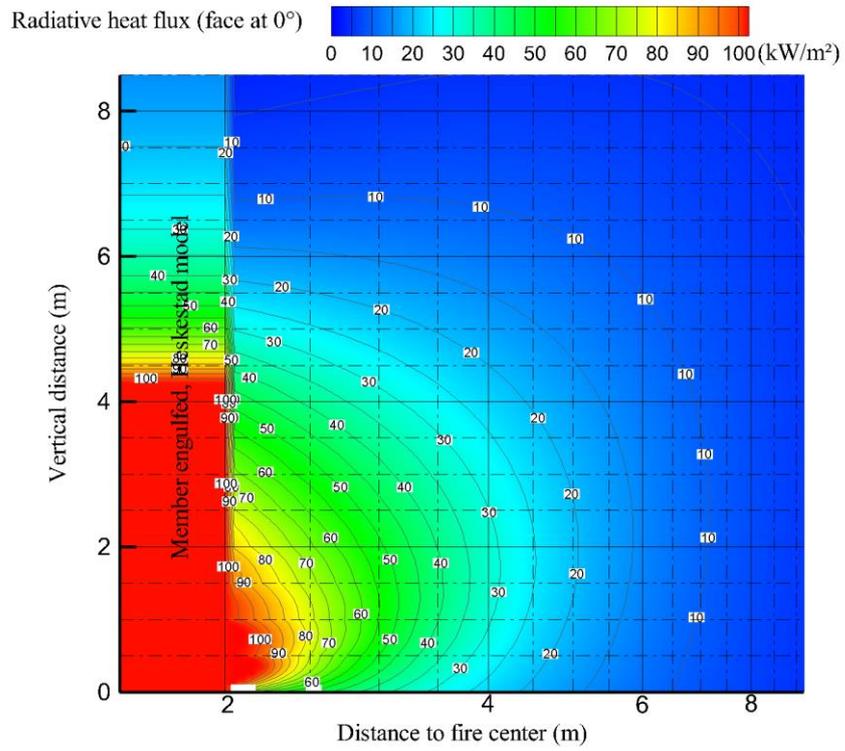


Figura C.11 Mapa de contorno para D = 4 m y HRR = 1000 kW/m²

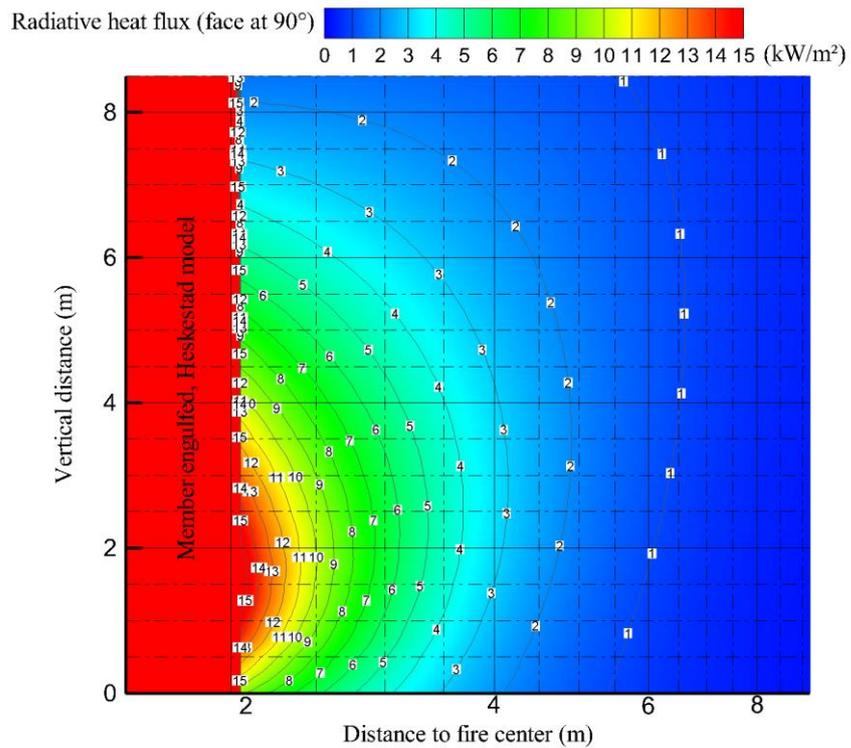
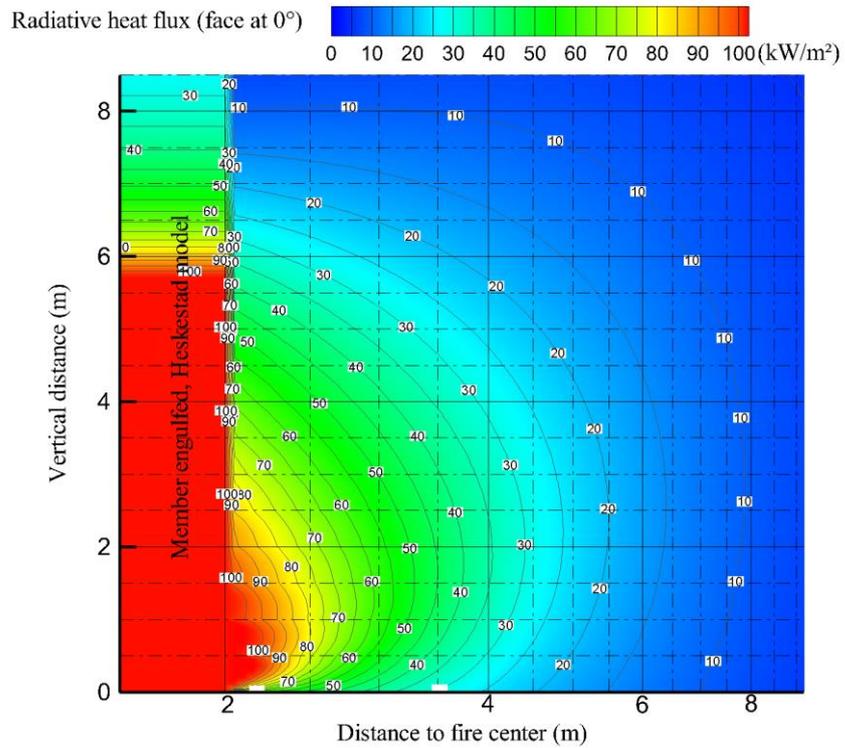


Figura C.12 Mapa de contorno para $D = 4 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

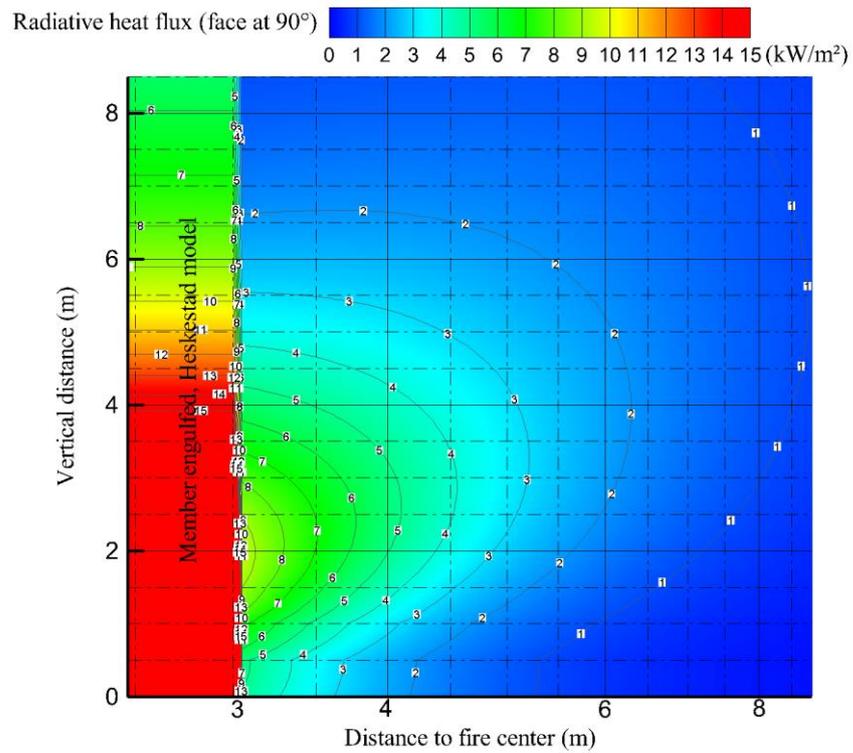
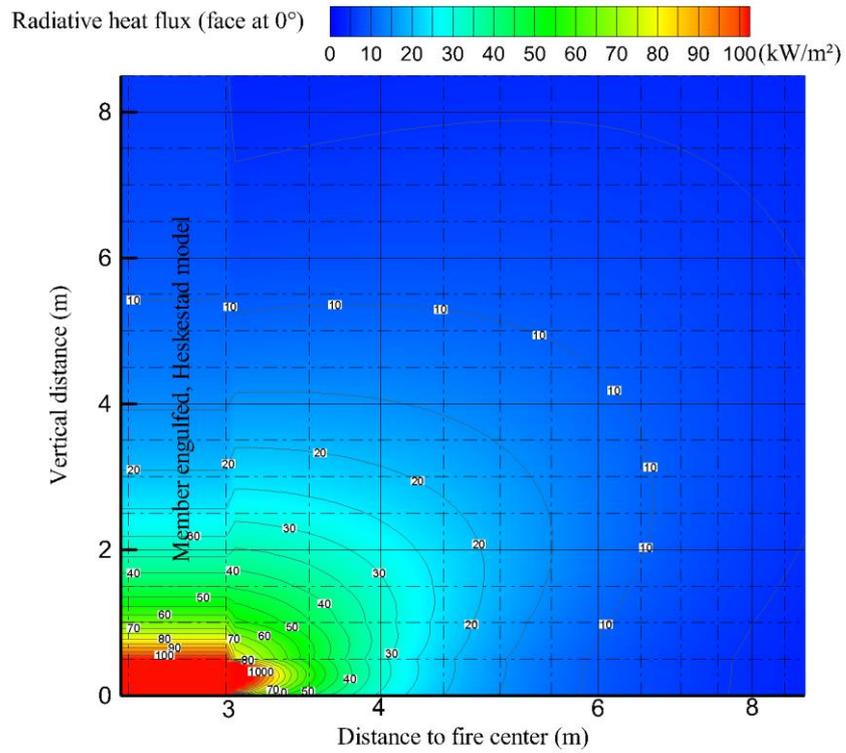


Figura C.13 Mapa de contorno para D = 6 m y HRR = 250 kW/m²

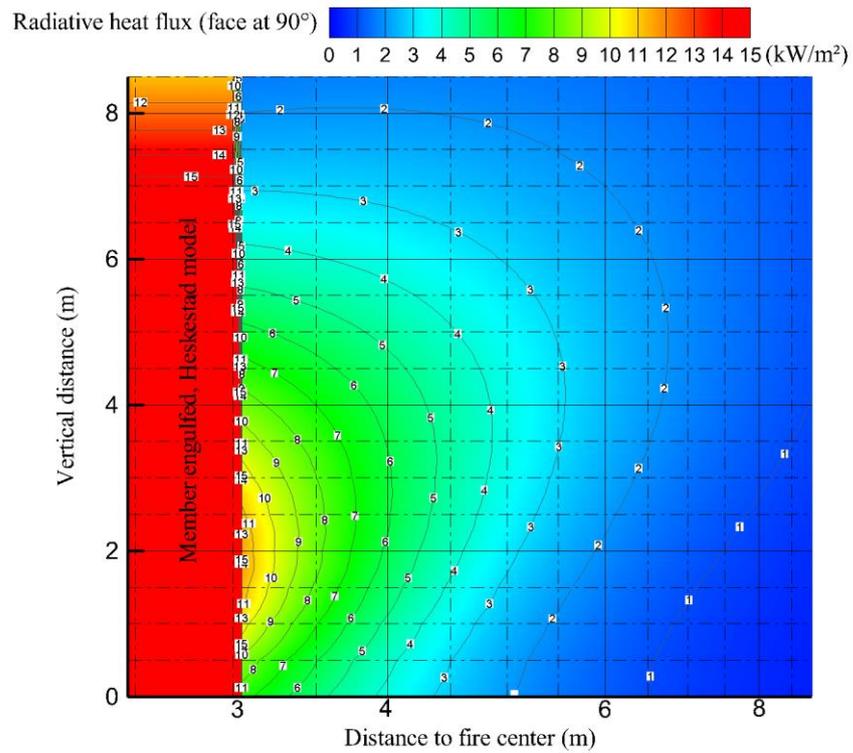
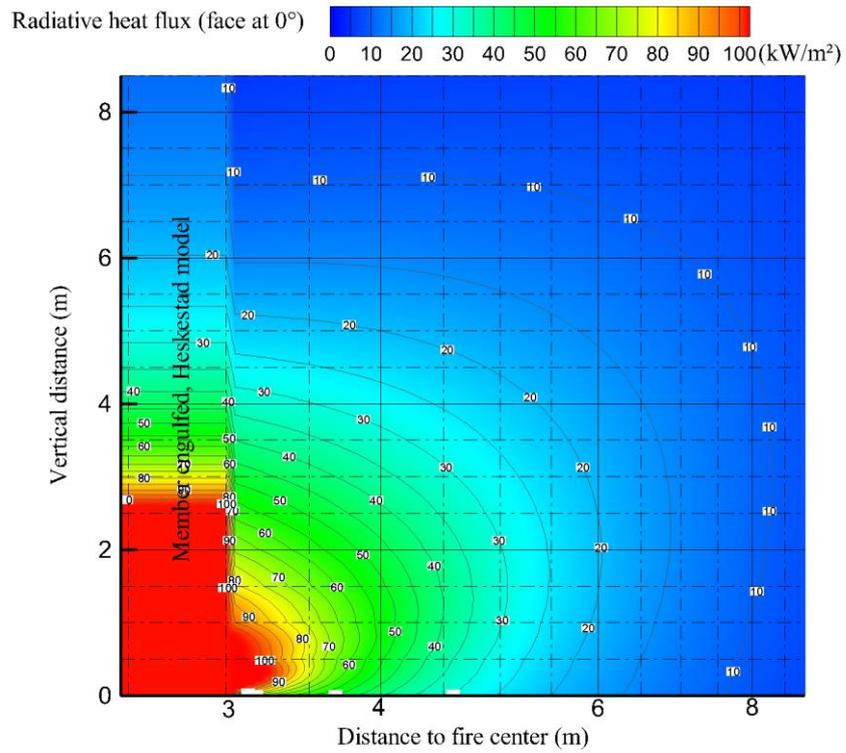


Figura C.14 Mapa de contorno para D = 6 m y HRR = 500 kW/m²

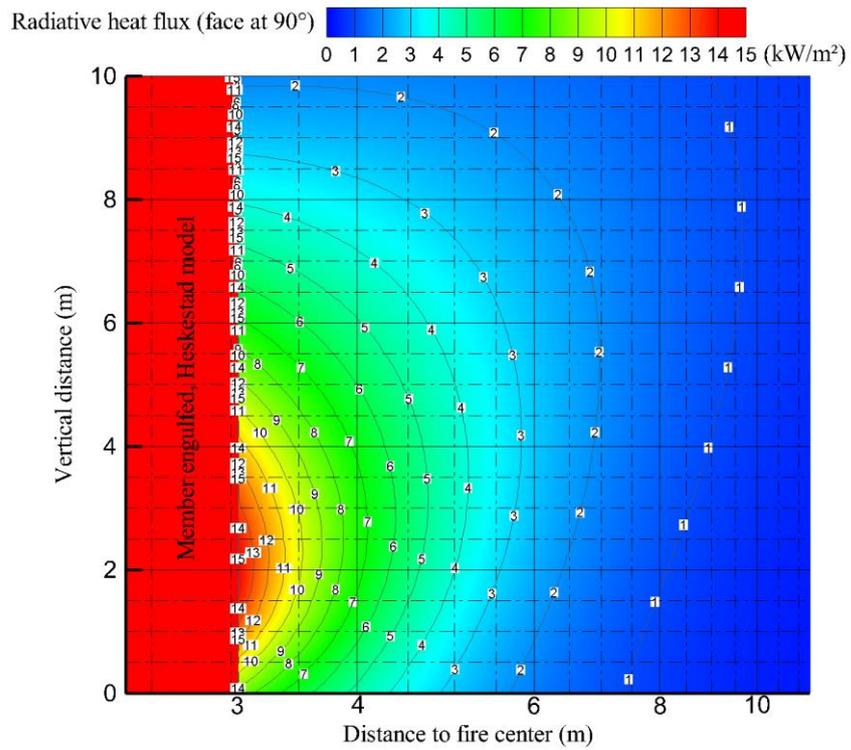
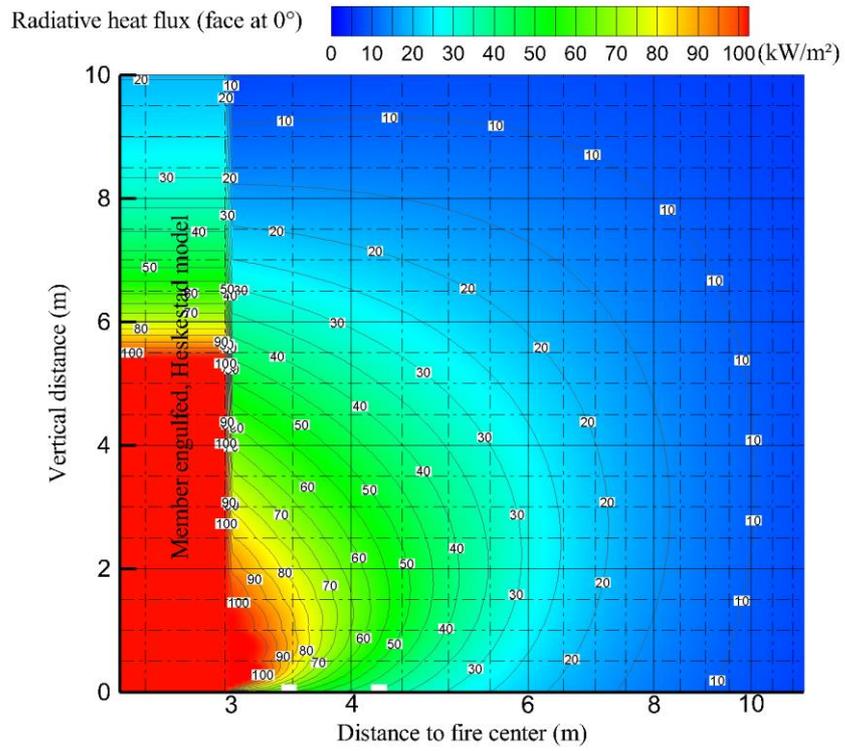


Figura C.15 Mapa de contorno para $D = 6 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

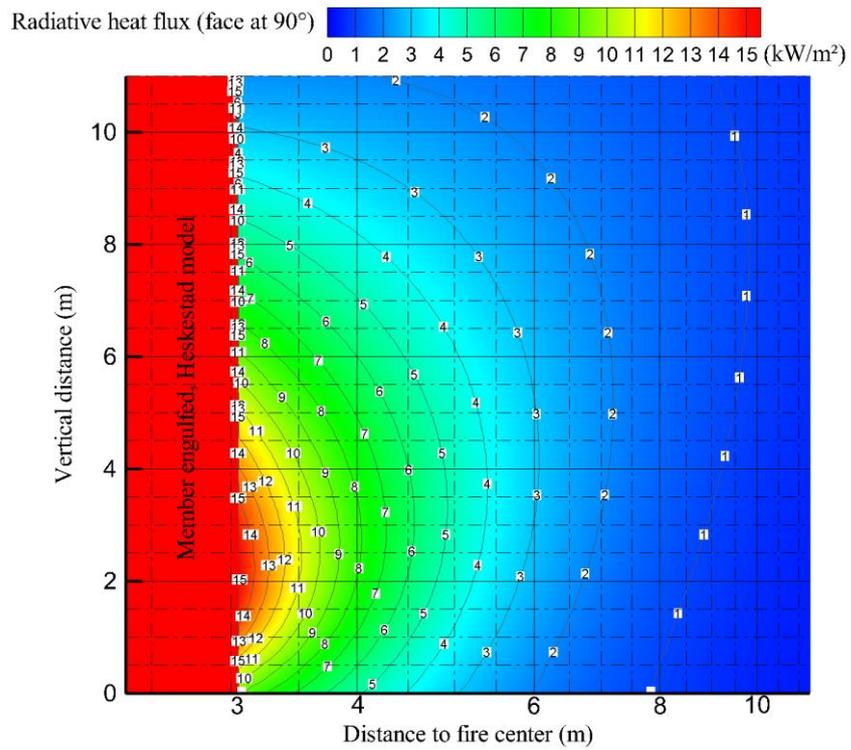
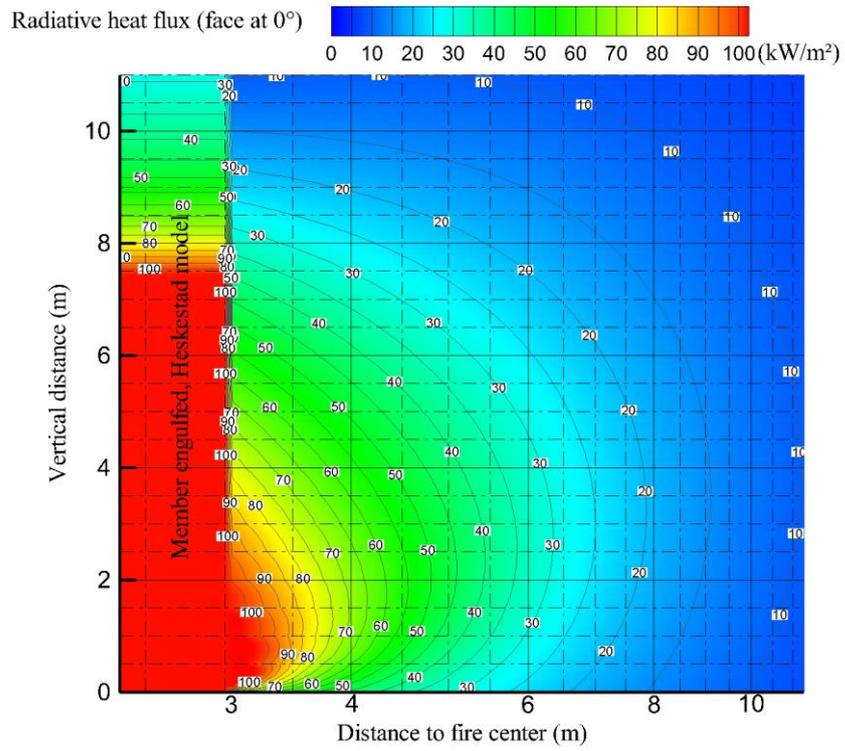


Figura C.16 Mapa de contorno para $D = 6$ m y $HRR = 1500$ kW/m²

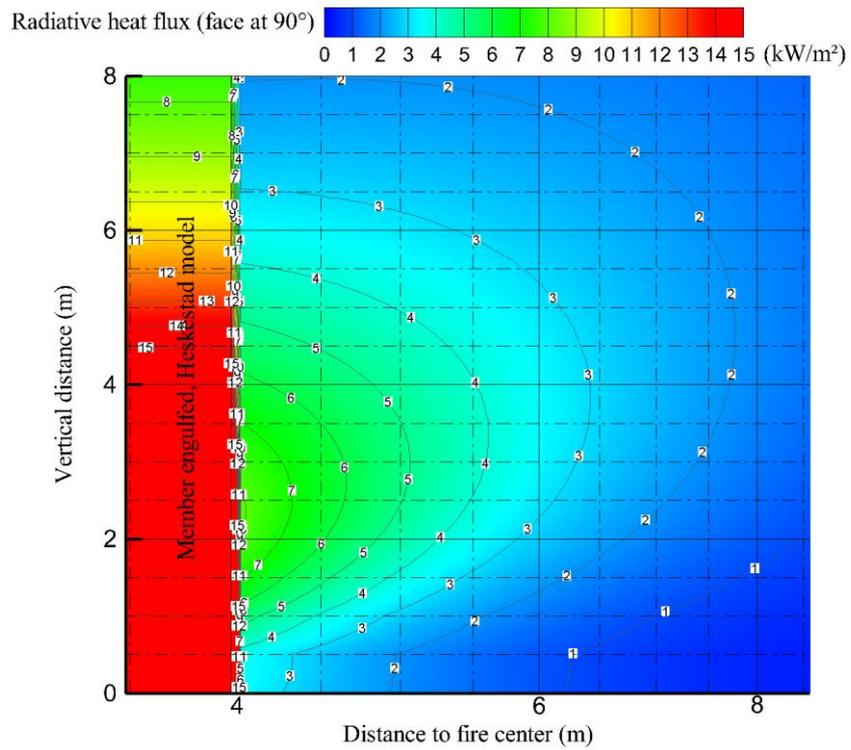
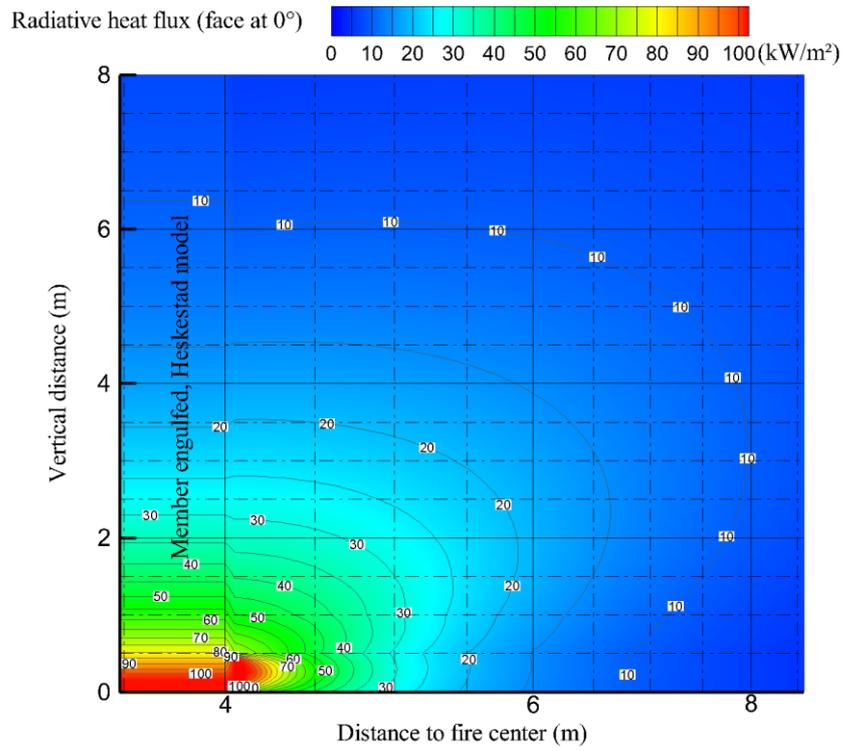


Figura C.17 Mapa de contorno para $D = 8 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

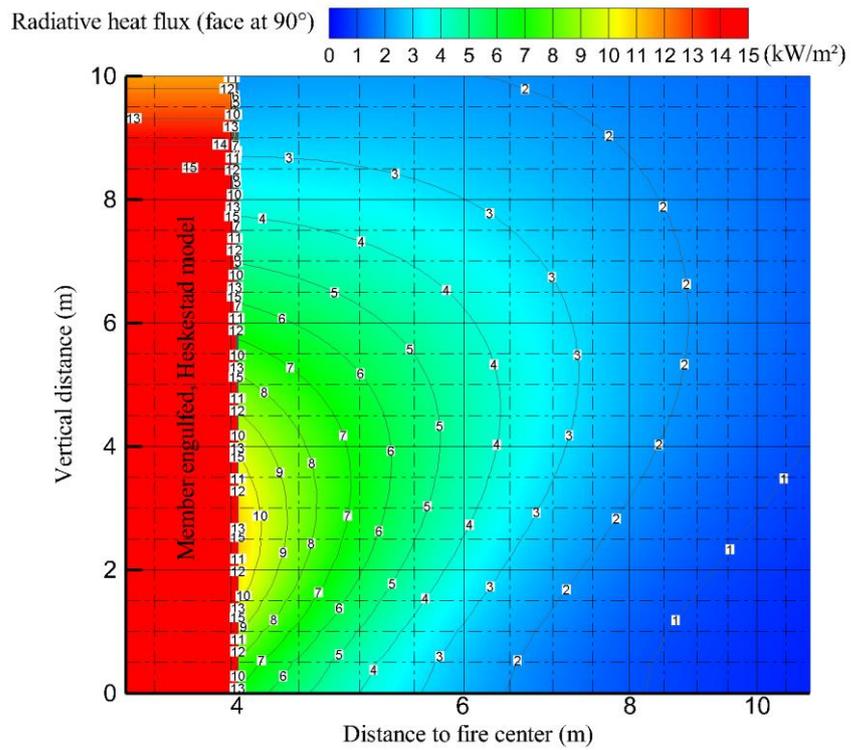
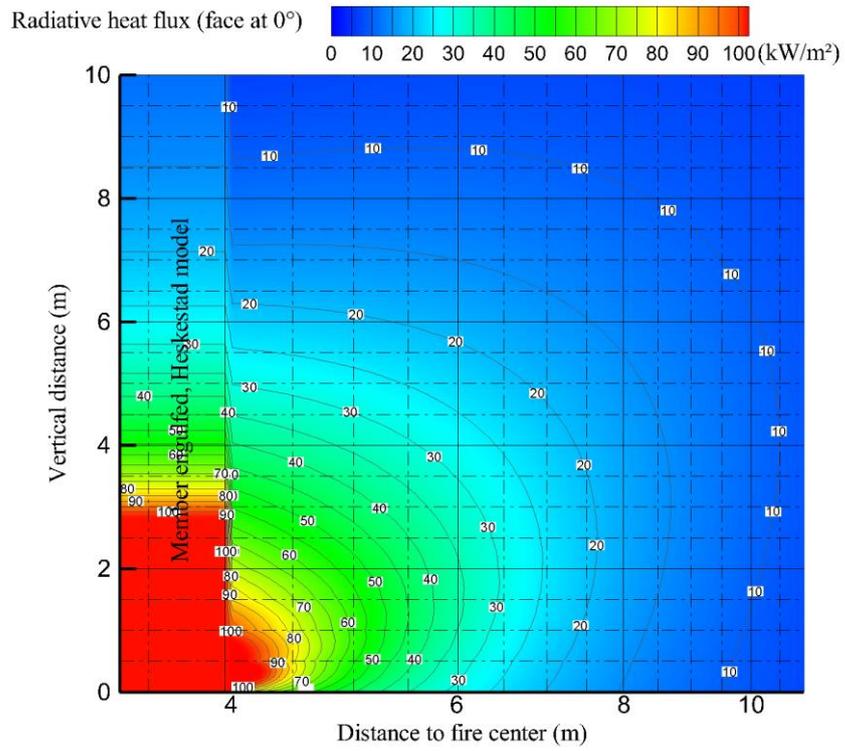


Figura C.18 Mapa de contorno para $D = 8 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

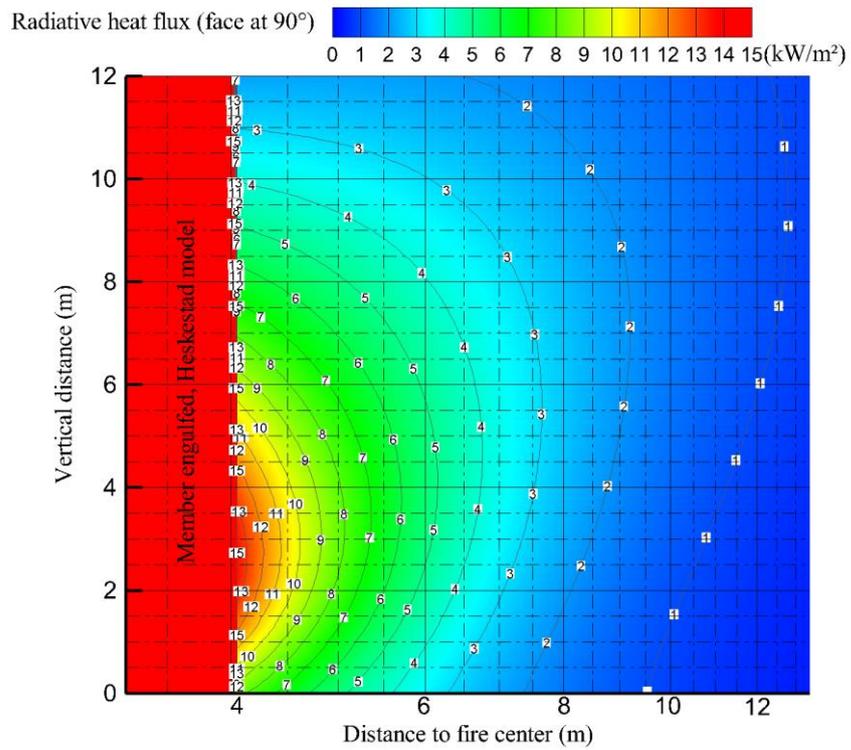
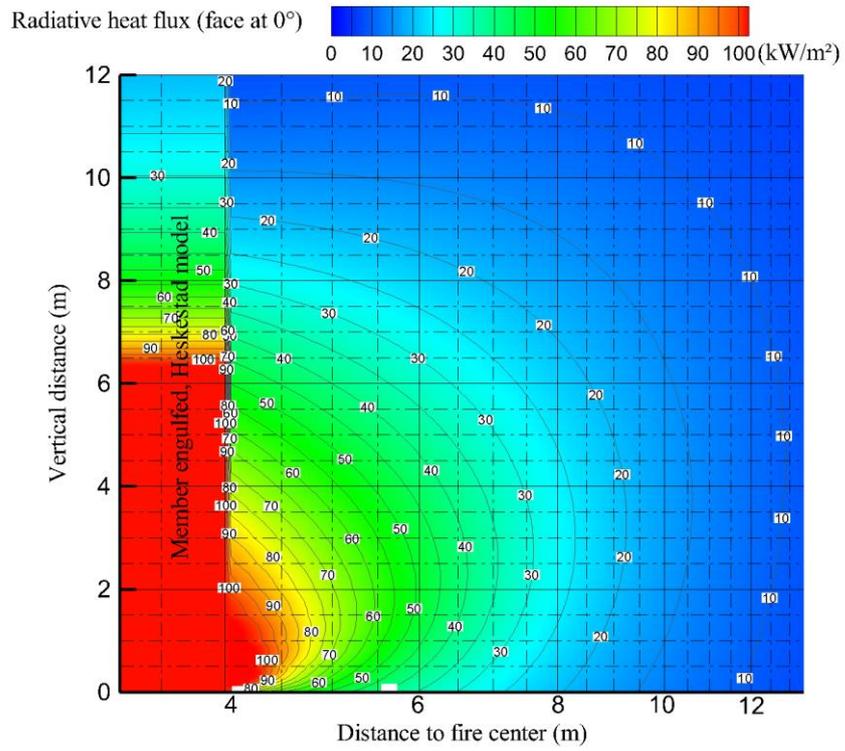


Figura C.19 Mapa de contorno para $D = 8 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

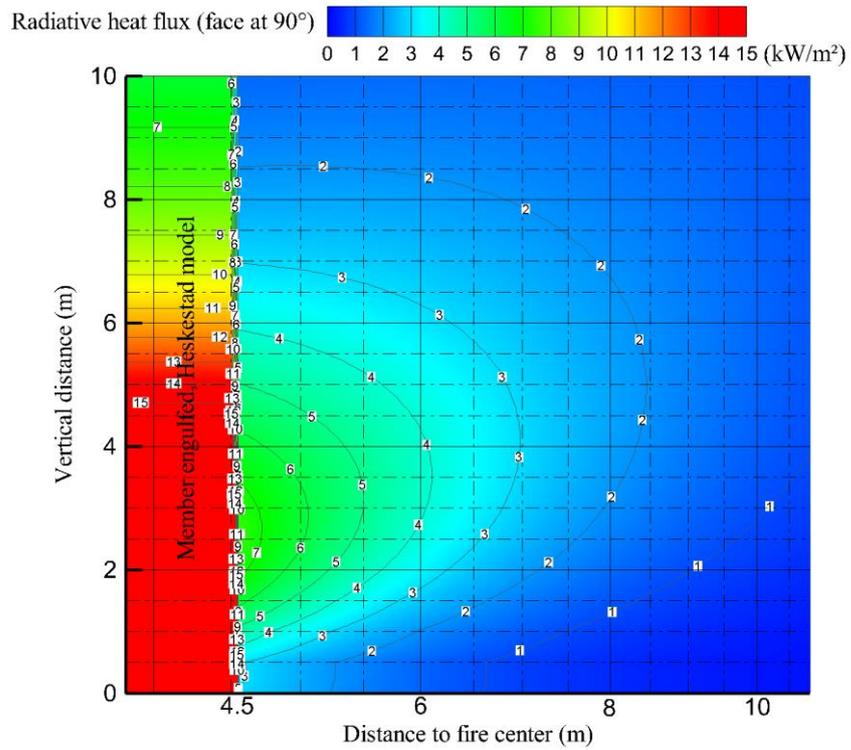
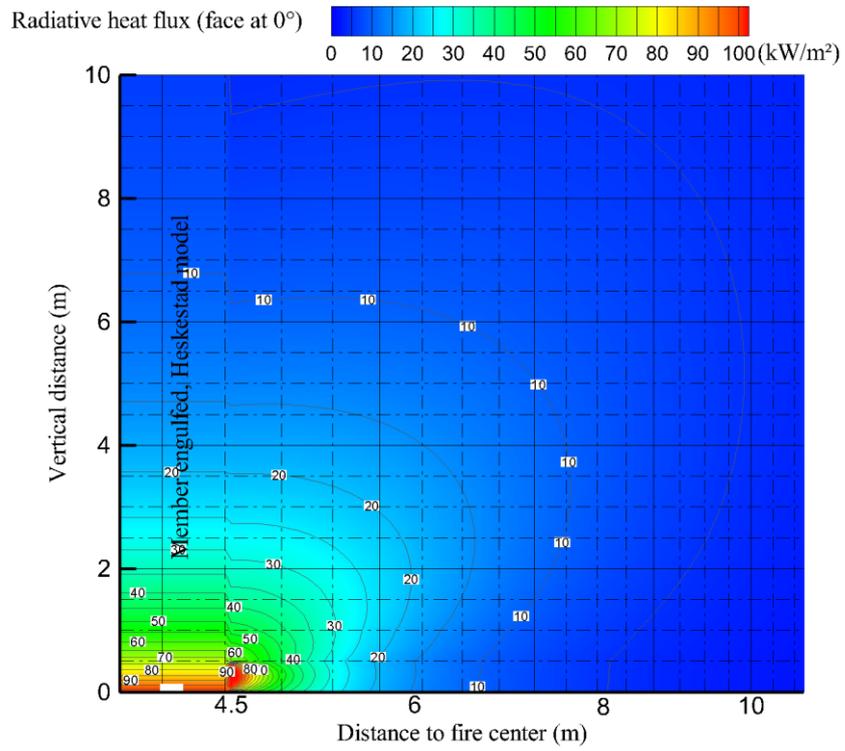


Figura C.20 Mapa de contorno para $D = 9 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

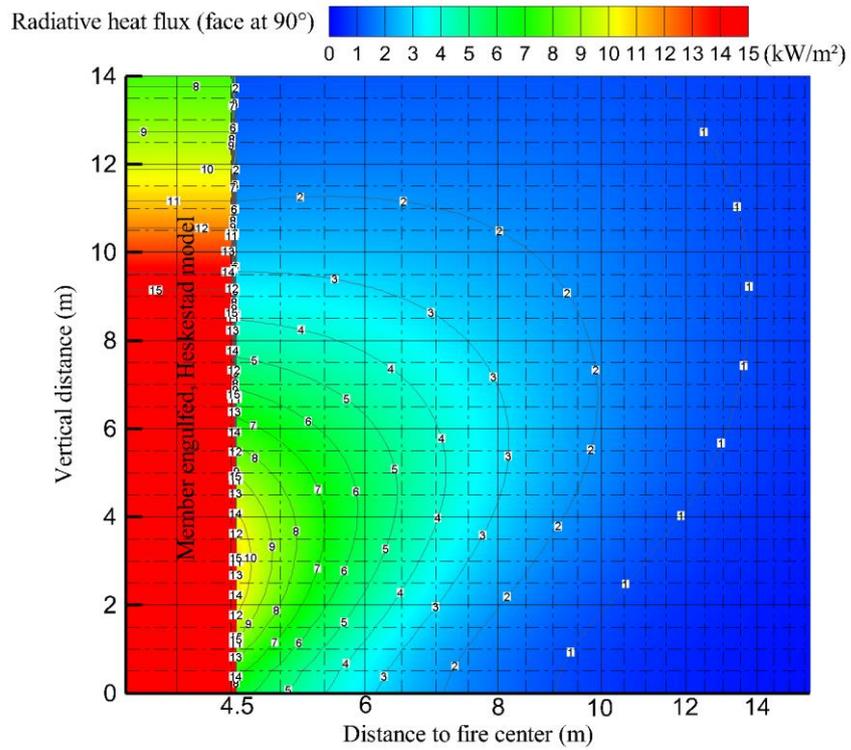
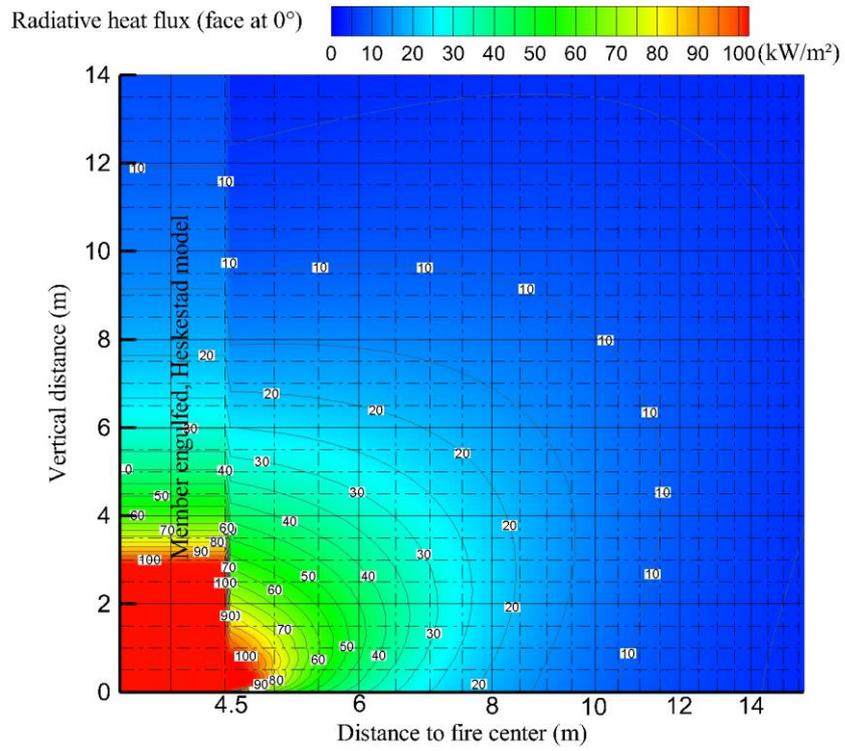


Figura C.21 Mapa de contorno para $D = 9 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

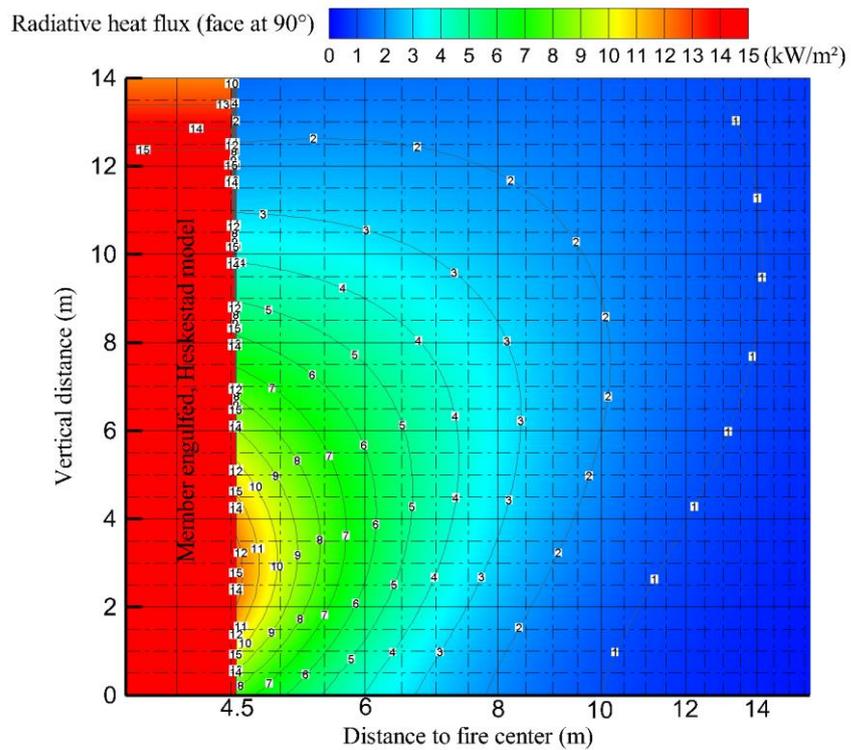
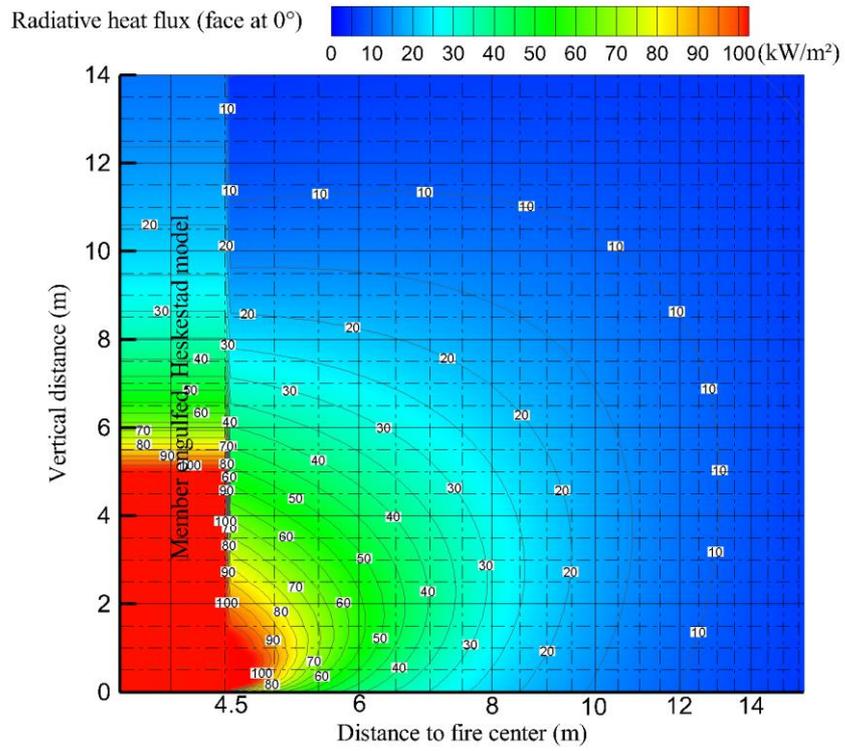


Figura C.22 Mapa de contorno para $D = 9 \text{ m}$ y $\text{HRR} = 750 \text{ kW/m}^2$

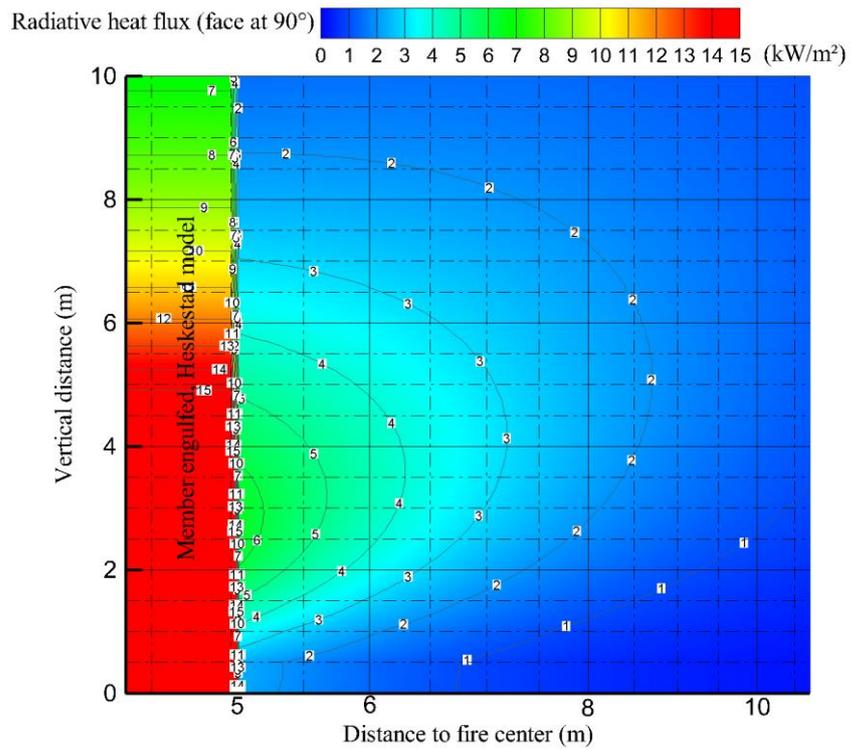
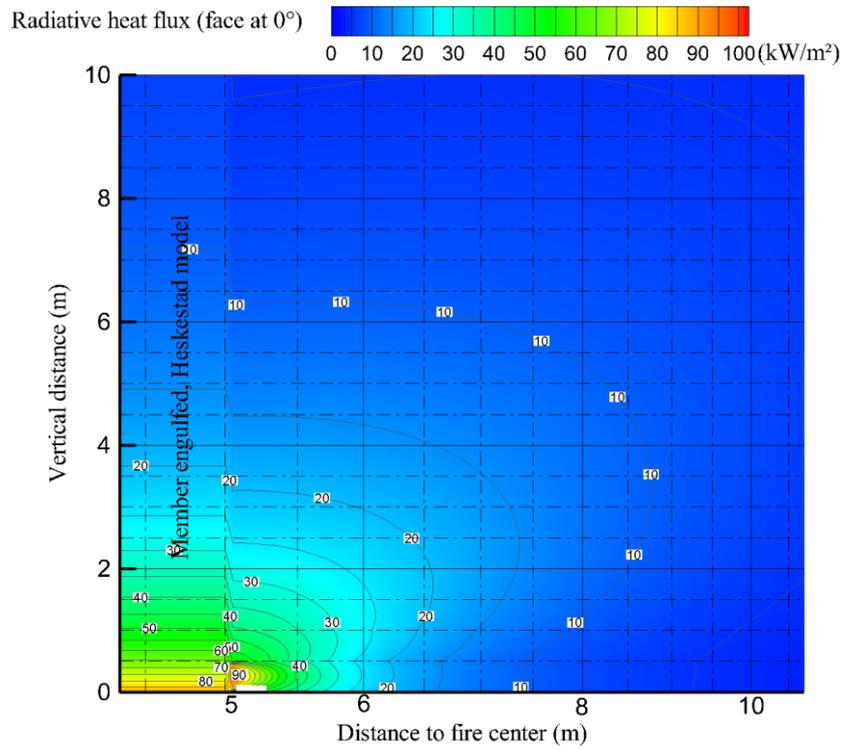


Figura C.23 Mapa de contorno para $D = 10$ m y $HRR = 250$ kW/m²

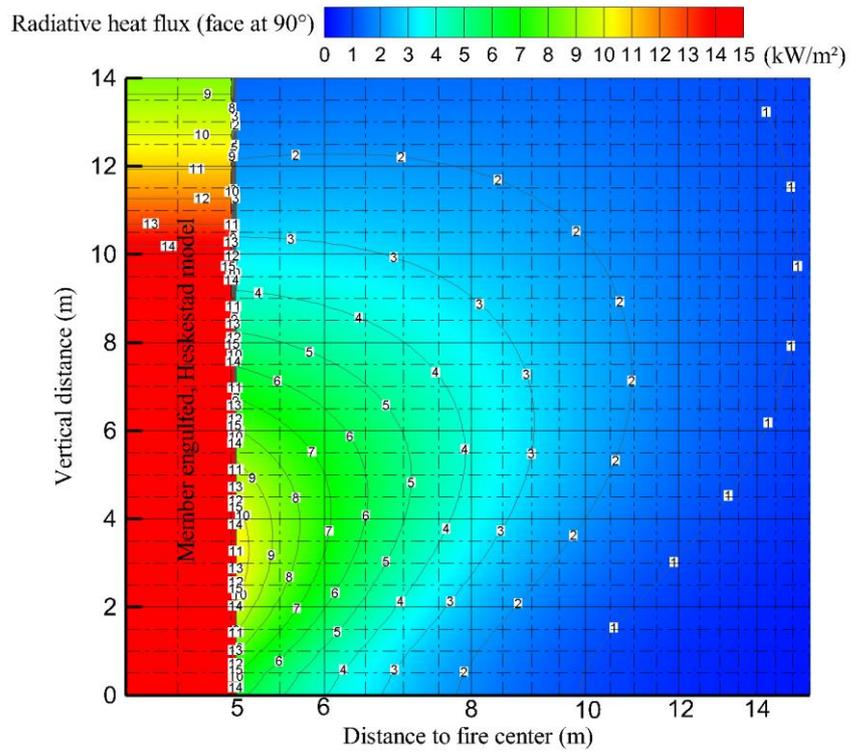
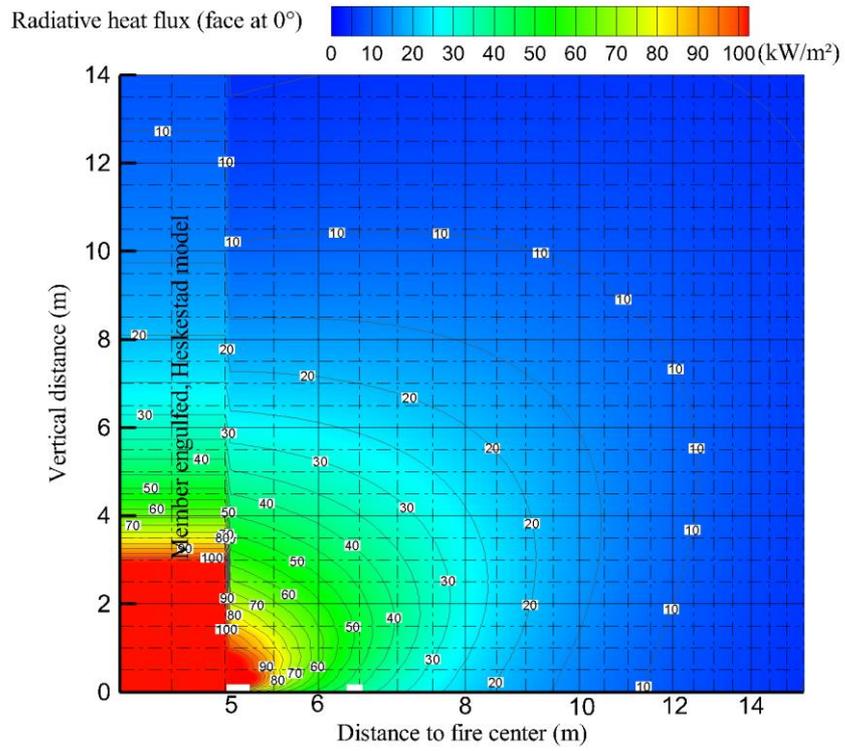


Figura C.24 Mapa de contorno para $D = 10$ m y $HRR = 500$ kW/m²

ANEXO D EJEMPLOS DE DISEÑO

Los ejemplos de diseño del presente Anexo ilustran la aplicación de los métodos descritos en la Sección 4 para determinar la temperatura de una columna en respuesta a un escenario de fuego localizado.

El primer ejemplo es una extensión directa del método para columnas ubicadas fuera del fuego, en la capa de humos calientes (zona 4). El segundo ejemplo se centra en la aplicación del nuevo modelo (zona 1) empleando los mapas de contorno y OZone. El tercer ejemplo es un caso complejo que implica cuatro focos de incendio y curvas de tasa de liberación de calor (HRR) no convencionales.

D.1 Edificio industrial

D.1.1 Escenario de cálculo en fuego

Se tiene un almacén de 60 m de longitud y 32 m de anchura, con una altura de cumbre de 14 m como puede verse en la Figura D.1. En cuanto a la estructura, ésta consta de pórticos metálicos a base de celosías dispuestos cada 10 m, siendo los montantes perfiles de sección HEA 220, mientras que las diagonales están ejecutadas mediante perfiles angulares (L60×60×6).

La superficie útil del edificio se utiliza principalmente para producción, salvo una pequeña zona de almacenamiento ubicada entre los dos primeros pórticos en la parte trasera del edificio. El fuego localizado dará comienzo en esta zona. Se almacenan 10 toneladas de material celulósico en una superficie de 50 m² (equivalente a un fuego de 8 m de diámetro), suficientemente distanciado de cualquier otro material combustible. La curva de tasa de liberación de calor (HRR) (Figura D.2) se basa en el método del Anexo E del EN 1991-1-2, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) La rapidez de desarrollo del fuego es media ($t_{\alpha} = 300$ s).
- b) El combustible es celulósico y libera 17.5 MJ/kg.
- c) La máxima velocidad de liberación de calor por unidad de superficie (RHR_f) es de 1000 kW/m².

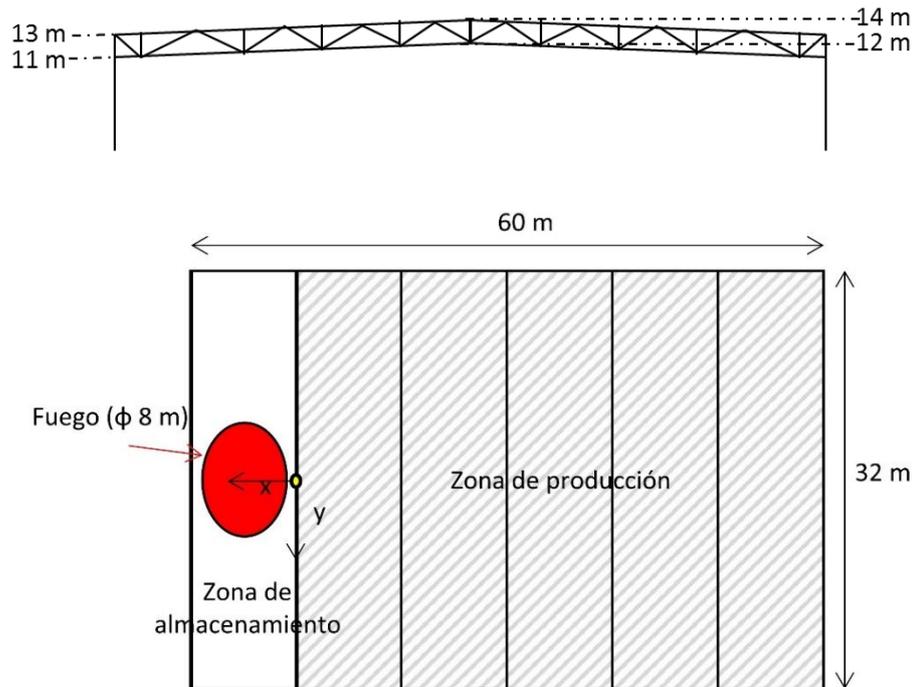


Figura D.1 Descripción del edificio industrial

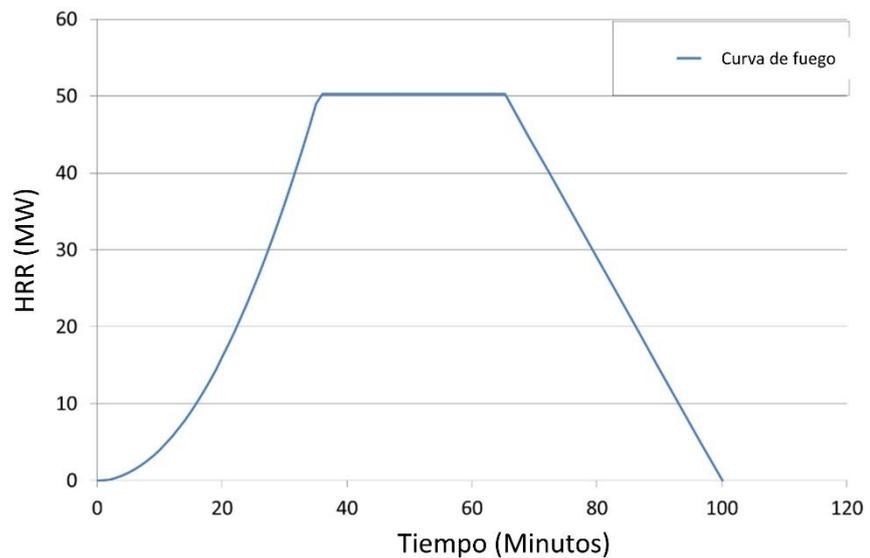


Figura D.2 Velocidad de liberación de calor para el fuego localizado en la zona de almacenamiento

D.1.2 Datos de entrada en OZone

El análisis térmico se centra en las celosías ubicadas dentro de la zona de humos, allá donde los elementos son más próximos al fuego. Esta posición corresponde con el centro de vano, situado a 12 m de altura para el cordón inferior y 14 m de altura para el cordón superior. Los datos de entrada se deducen del párrafo previo y se introducen en la pestaña “Fuego” y “Perfil de Acero”, tal y como se indica en la Figura D.3 y Figura D.4.

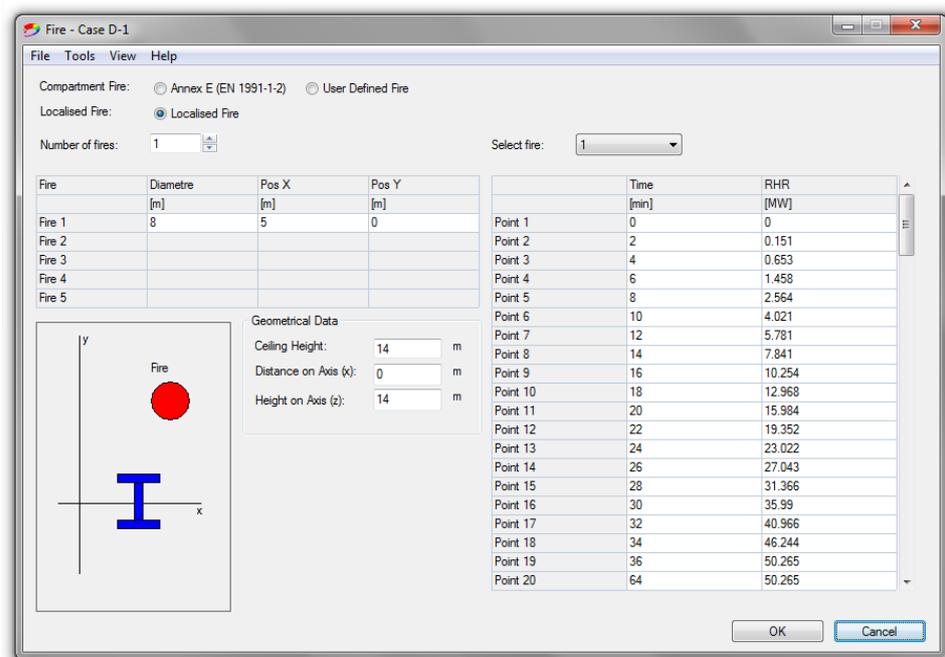


Figura D.3 Datos de entrada en la pestaña “Fuego”

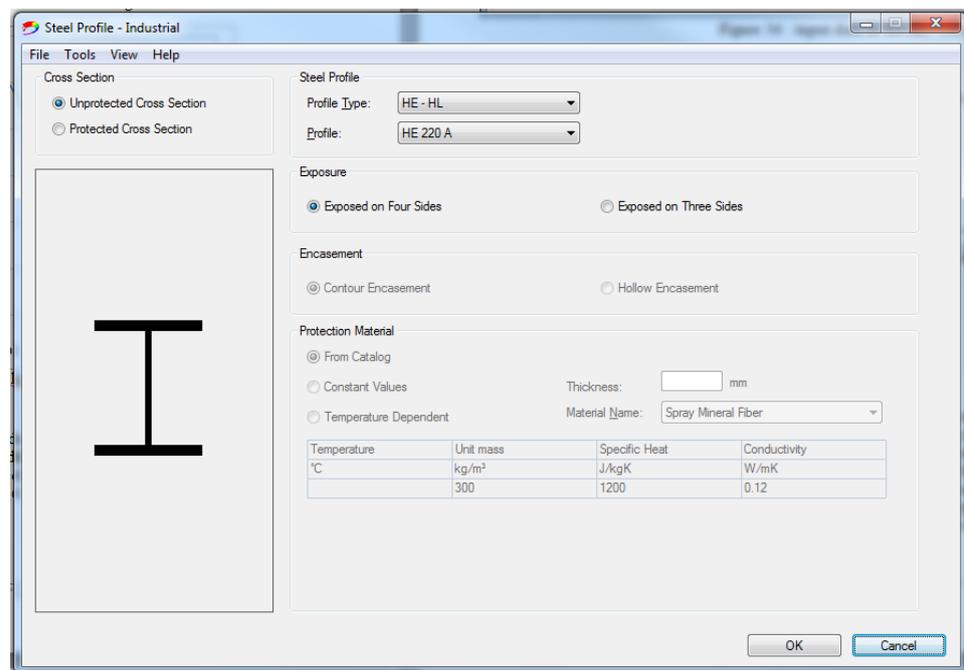


Figura D.4 Datos de entrada en la pestaña “Perfil de acero”

D.1.3 Resultados de OZone

Con un fuego de 8 m de diámetro y una tasa máxima de liberación de calor de 50 MW, la altura de la llama es de 9.7 m. Puesto que el edificio es más alto que el penacho, las llamas no impactarán contra el techo. El efecto del fuego resultará por tanto reducido en términos de acciones térmicas, quedando las temperaturas en la posición calculada de la celosía entre 50°C y 80°C (Figura D.5).

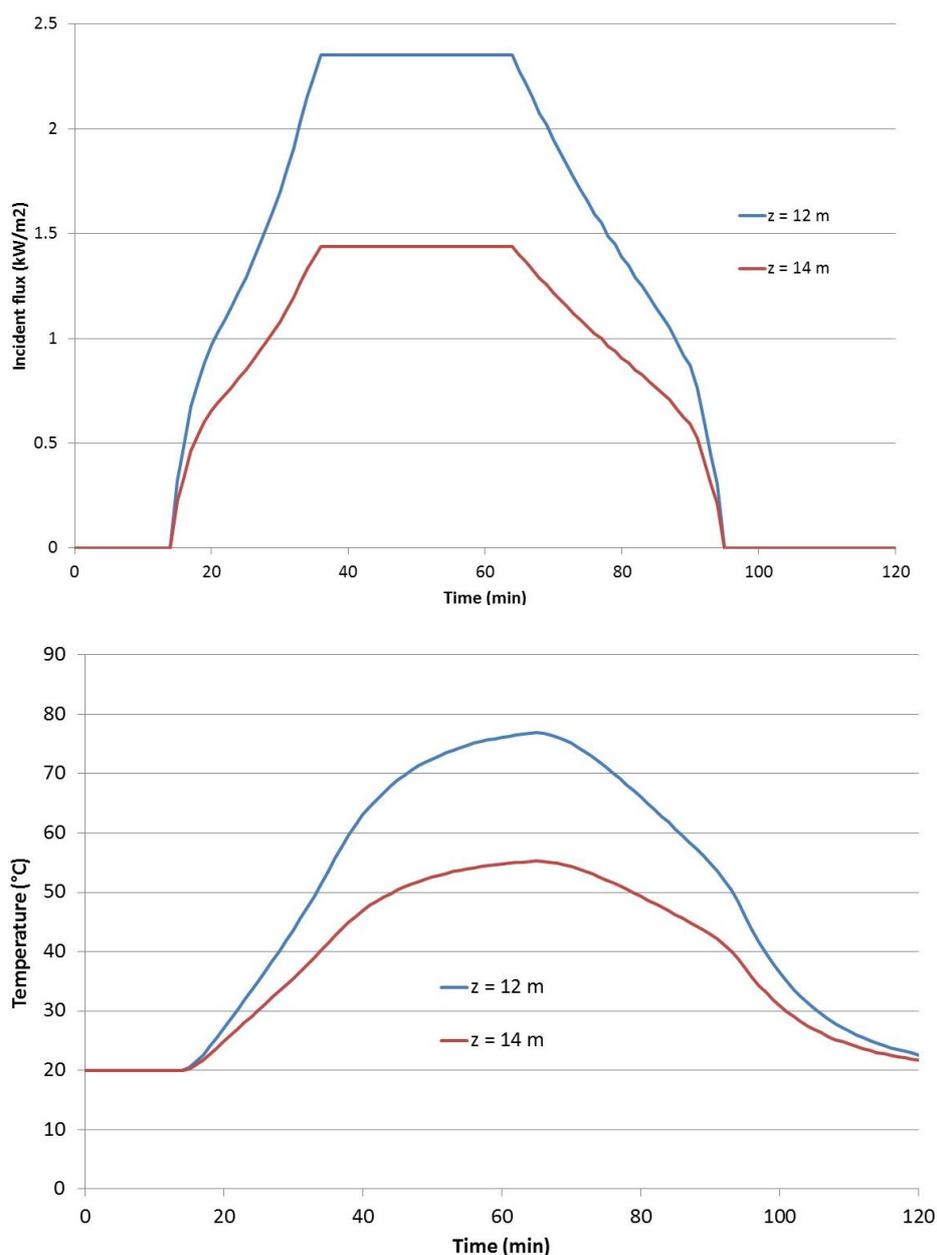


Figura D.5 Flujo de calor por radiación recibido (arriba) y temperatura (abajo)

D.2 Edificio de oficinas

D.2.1 Escenario de cálculo en fuego

El edificio de oficinas de este ejemplo consta de 6 plantas (véase la Figura D.6). Sus dimensiones son 30 m x 15 m y la altura del techo 3.5 m; las columnas están formadas por perfiles de acero HEA260 situadas en el perímetro del edificio. El escenario de fuego se basa en la ignición de papel para imprimir. Éste se encuentra almacenado en un pallet con una masa de 500 kg repartida en un área de 2.5 m² (2 m × 1.25 m). En cuanto a su posición, el fuego se encuentra localizado frente a uno de los pilares del edificio, a 0.8 m de su ala, como se indica en la Figura D.6.

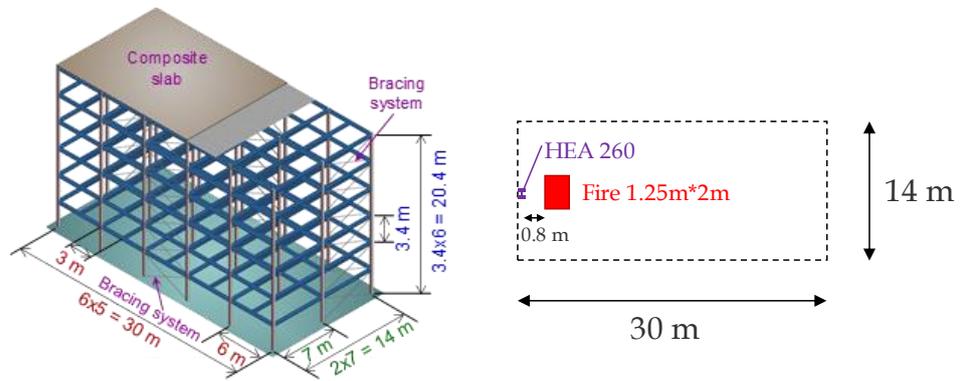


Figura D.6 Dimensiones del edificio de oficinas (izquierda) y posición de la fuente de ignición (derecha)

La curva HRR se construye siguiendo las recomendaciones del Anexo E del EN 1991-1-2. La curva presenta tres fases claramente diferenciadas: fase de crecimiento o desarrollo, estado estacionario y fase de decaimiento (Figura D.7). La fase de desarrollo viene definida por la expresión:

$$Q(t) = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (D.1)$$

Donde Q es la velocidad de liberación del calor (HRR), t es el tiempo en segundos y t_α es el tiempo necesario para alcanzar una velocidad de liberación de calor de 1 MW. Para un edificio de oficinas, t_α es igual a 300 s. Para un fuego localizado, el HRR no viene limitado por la ventilación, sino por la superficie del fuego. Suponiendo una máxima velocidad de liberación de calor de 1000 kW/m², se tiene un máximo HRR de 2.5 MW. La fase de decaimiento comienza cuando el 70% de la carga total de fuego se ha consumido y se completa cuando el 100% de la carga se ha consumido.

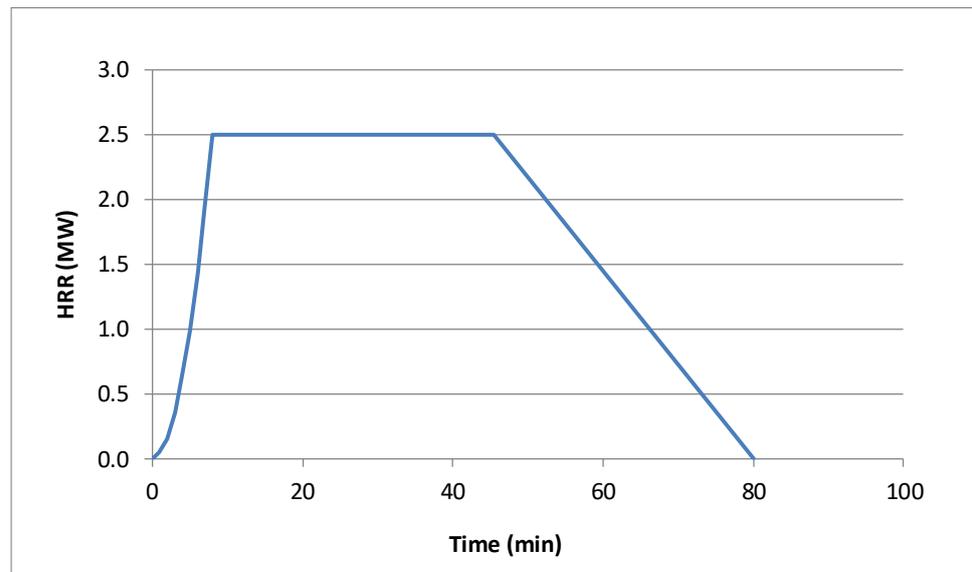


Figura D.7 Velocidad de liberación de calor según el Anexo E del EN 1991-1-2

D.2.2 Empleo de los mapas de contorno

De acuerdo con la Sección 4.2.1: la superficie del fuego se convierte en un área equivalente circular. Su diámetro es de 1.8 m para un área de 2.5 m² (Figura D.8). La dimensión mayor de la sección de la columna mide 260 mm y dista 1.4 m del centro del fuego.

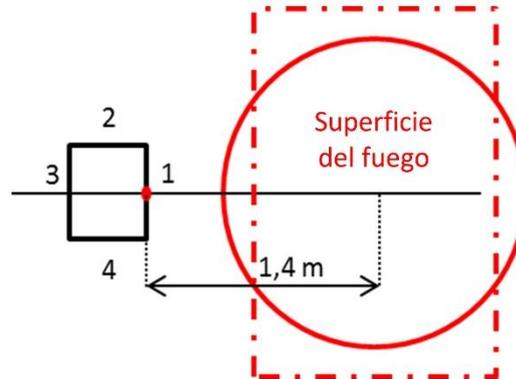


Figura D.8 Configuración adaptada

La máxima velocidad de liberación de calor es de 1000 kW/m² y se corresponde con uno de los valores disponibles en la lista de mapas de contorno. Para el diámetro, se selecciona el valor inmediatamente superior disponible, de 2 m. Los valores pueden leerse de la Figura C.3.

La columna se subdivide en segmentos de 0.5 m. Los flujos de calor medios para cada segmento se calculan empleando la Ecuación (4.2). Estos valores se presentan en la Tabla D.1. Nótese que los valores en la capa de humos calientes (por encima de 3.15 m de altura) no se muestran.

Tabla D.1 Flujos de calor

Altura (m)	Flujo de calor		
	Cara 1	Cara 2	Promedio
0.5	65	7	19.75
1	60	7.5	18.75
1.5	55	7	17.25
2	45	6	14.25
2.5	35	5	11.25
3	25	4	8.25

En la cara 1, el máximo flujo de calor por radiación se encuentra a 0.5 m de altura y tiene un valor de 19.75 kW/m². Haciendo uso de la Figura 4.9, se asigna una temperatura de equilibrio de 300°C.

D.2.3 Empleo de OZone

D.2.3.1 Datos de entrada en OZone

El procedimiento para calcular la evolución del flujo de calor y temperatura a lo largo de la columna debido a un fuego localizado con OZone sigue los mismos pasos descritos anteriormente.

En primer lugar, se debe proporcionar la posición de la fuente del fuego en relación a la posición de la columna (que se supone localizada en $X=0$, $Y=0$), junto con la evolución del HRR en la ventana ‘Fuego Localizado’: con un espaciado de 0.5 m y un diámetro del fuego de 1.8 m (centro), se posiciona en 1.4 m, véase la Figura D.9. En la misma ventana, se debe proporcionar la altura del compartimento, junto con la localización del punto de cálculo deseado (una altura a lo largo del eje de la columna entre $z = 0.5$ m y 3.5 m). A continuación, en la pestaña “Perfil de Acero”, se selecciona el perfil HE260A.

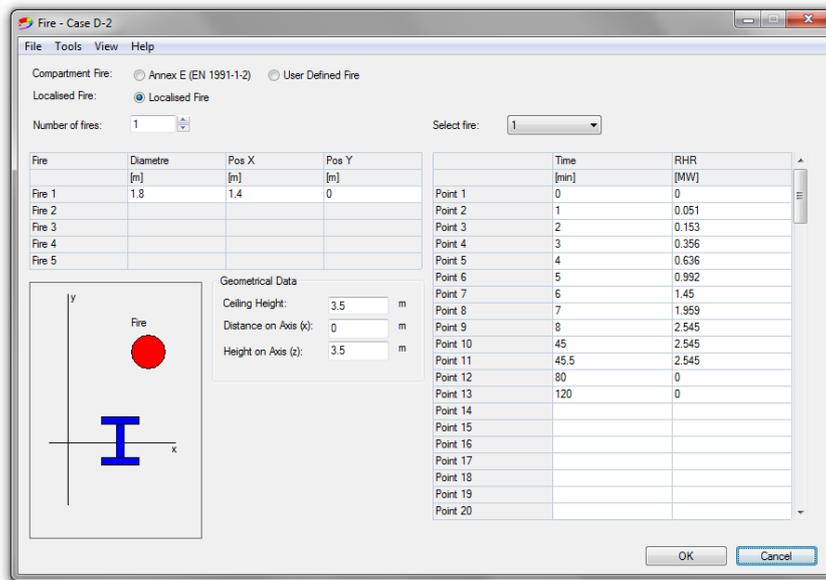


Figura D.9 Datos de entrada en la pestaña “Fuego”

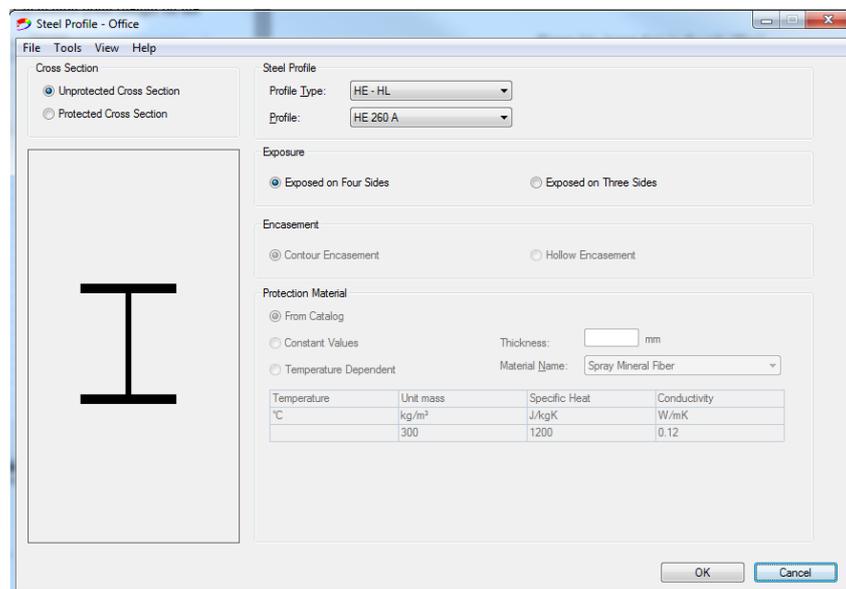


Figura D.10 Datos de entrada en la pestaña “Perfil de Acero”

D.2.3.2 Resultados de OZone

Los resultados de temperatura y flujos de calor se presentan en la Figura D.11 para segmentos de 0.5 m a lo largo del eje de la columna (0.5 m – 1.0 m – 1.5 m – 2.0 m – 2.5 m – 3.0 m – 3.5 m). La máxima temperatura calculada es de 262°C a 0.5 m y 1.0 m. Esto implica que se alcanzarán temperaturas algo superiores entre estos dos niveles (evolución de la temperatura en forma de campana debido a la forma cónica de la llama virtual sólida). En la capa de humos calientes, la temperatura alcanza 287°C.

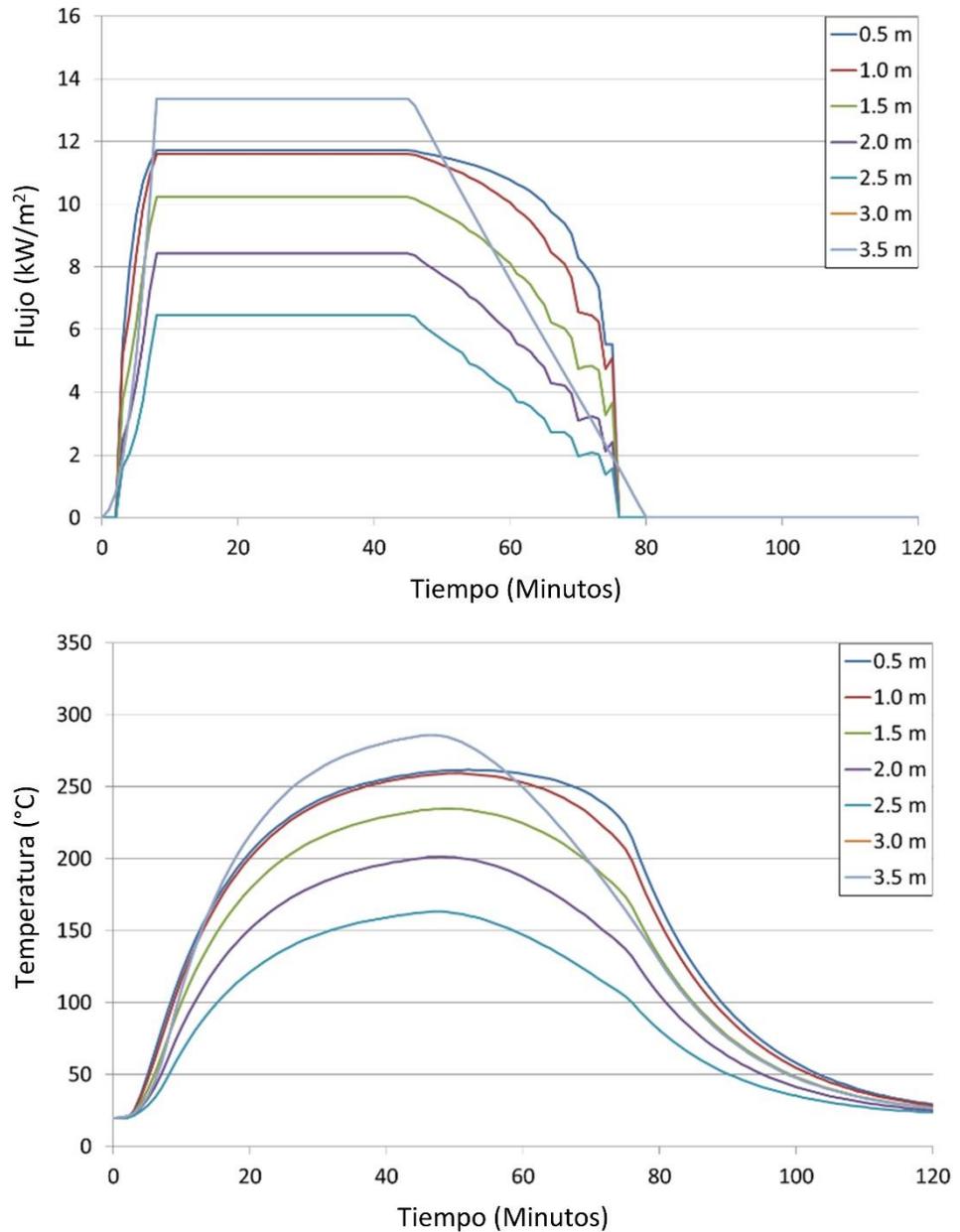


Figura D.11 Flujo de calor por radiación recibido (arriba) y temperatura (abajo)

D.2.4 Cálculo de la columna

Una vez conocida la temperatura de la columna, se puede proceder a su cálculo. El edificio empleado para este ejemplo se ha tomado de la publicación: ‘Eurocodes: Background and applications - Structural fire design - Worked examples’, disponible a través de la Comisión Europea^[19].

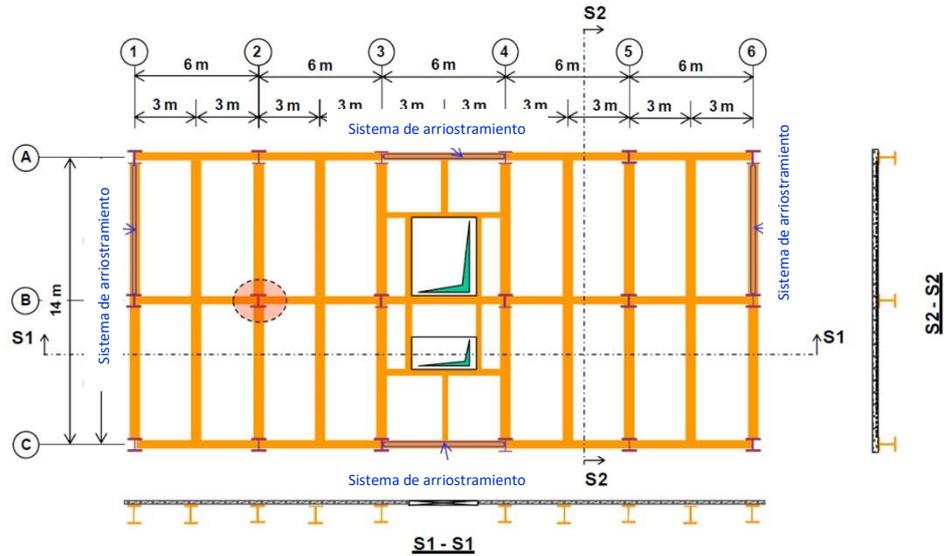


Figura D.12 Emplazamiento de la columna

D.2.4.1 Carga aplicada

En cada nivel de piso, esta columna recibe cargas puntuales de dos vigas secundarias simplemente apoyadas y dos vigas principales simplemente apoyadas. En situación de incendio, las cargas aplicadas sobre las vigas secundarias simplemente apoyadas son cargas uniformemente distribuidas con un valor de 14.105 kN/m. Las cargas aplicadas a las vigas principales simplemente apoyadas son: una carga puntual en centro de vano de valor 202.4 kN y una carga uniformemente distribuida con un valor de 1.12 kN/m. Por tanto, la carga puntual aplicada a esta columna incluye las reacciones de apoyo tanto de la viga secundaria como de la viga principal. Además de la carga mencionada, se debe tener en cuenta el peso propio de la columna, que es de 1.15 kN/m.



Figura D.13 Cargas aplicadas sobre la columna de planta baja

Por tanto, la carga aplicada sobre esta columna se puede calcular como sigue.
 En cada planta, la carga puntual transmitida por las vigas es:

$$P_{fi,d,t} = \Sigma(G_{k,1} + \psi_{2,1}Q_{k,1}) = 14.105 \times 7 + 202.4 + 1.12 \times 6 \approx 307.9 \text{ kN} \quad (\text{D.2})$$

Nota: Dependiendo del país, se empleará $\Psi_{1,1}$ o $\Psi_{2,1}$.

El peso propio de la columna en cada planta (considerando del lado de la seguridad que la sección es la misma en toda la altura del edificio) es:

$$q_{fi,d,t} = 1.15 \times 3.4 \approx 3.9 \text{ kN} \quad (\text{D.3})$$

Por tanto, la carga axial total aplicada a esta columna es:

$$N_{fi,d,t} = (307.9 + 3.9) \times 6 = 1870.8 \text{ kN} \quad (\text{D.4})$$

D.2.4.2 Clasificación de la columna

La clasificación de esta columna se puede realizar combinando la Tabla 5.2 del EN 1993-1-1 y el apartado 4.2 del EN 1993-1-2 para una sección transversal comprimida.

Las dimensiones del perfil HEB300 se resumen en la Figura D.14.

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$t_w = 11 \text{ mm}$$

$$t_f = 19 \text{ mm}$$

$$r = 27 \text{ mm}$$

$$h_w = 262 \text{ mm}$$

$$d = 208 \text{ mm}$$

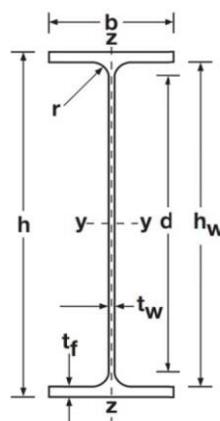


Figura D.14 Dimensiones y notación de perfiles en forma de I o H

Según el apartado 4.2 del EN 1993-1-2:

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{235/f_y} = 0.786 \quad \text{con grado de acero S275} \quad (\text{D.5})$$

Según la Tabla 5.2 del EN 1993-1-1, el criterio para alas y almas de Clase 1 es:

$$\text{alma: } \frac{c}{t_w} \leq 33\varepsilon \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 33\varepsilon = 25.9$$

$$\text{ala: } \frac{c}{t_f} \leq 9\varepsilon \Rightarrow \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} \leq 9\varepsilon = 7.07$$

Con estas dimensiones:

$$\begin{aligned} \text{alma: } \quad \frac{d}{t_w} &= \frac{208.0}{11} = 18.9 < 25.9 \\ \text{ala: } \quad \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} &= \frac{\left(\frac{300}{2} - \frac{11.0}{2} - 27\right)}{19} = 6.18 < 7.07 \end{aligned}$$

Por tanto, la columna se clasifica como Clase 1.

D.2.4.3 Cálculo de la resistencia empleando el modelo LOCAFI

En base a la temperatura y las propiedades seccionales de la columna, es posible calcular su resistencia.

La temperatura de cálculo se toma igual a 275°C. Se ha empleado la misma temperatura que la predicha por OZone para la columna HEA260 de fachada, según se muestra en la Figura D.11. Los factores de reducción del material pueden ser extraídos de la Tabla 3.1 del EN 1993-1-2:

$$k_{y,\theta} = 1.0 \tag{D.6}$$

$$k_{E,\theta} = 0.825$$

El radio de giro de la sección se toma como:

$$i = 75.8 \times 10^{-3} \text{ m} \tag{D.7}$$

La longitud efectiva de pandeo en situación de incendio se toma igual a 0.7 veces la altura de planta, según se muestra en la Figura 5.2. La esbeltez adimensional a temperatura ambiente se calcula como sigue:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{93.9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}} = \frac{(0.7 \times 3.4)}{(75.8 \times 10^{-3})} \frac{1}{93.9 \sqrt{\frac{235}{275}}} = 0.361 \tag{D.8}$$

La esbeltez adimensional a temperatura elevada se calcula de la siguiente forma:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.361 \sqrt{\frac{1.0}{0.825}} = 0.398 \tag{D.9}$$

El coeficiente de reducción a pandeo de la columna a temperatura elevada puede entonces calcularse mediante las siguientes tres ecuaciones:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.60 \tag{D.10}$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right) = \frac{1}{2} \left(1 + 0.6 \times 0.398 + 0.398^2 \right) = 0.699 \tag{D.11}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0.699 + \sqrt{0.699^2 - 0.398^2}} = 0.786 \tag{D.12}$$

La resistencia a pandeo de la columna a temperatura elevada se obtiene finalmente como:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.786 \times \frac{14908}{1000} \times 1.0 \times \frac{275}{1.0} = 3221.2 \text{ kN} \quad (\text{D.13})$$

D.2.4.4 Comparación de la resistencia con la carga aplicada

El paso final de cálculo consiste en comparar la resistencia de la columna a temperatura elevada con la carga aplicada:

$$\mu_e = \frac{1871}{3221} = 0.58 \quad (\text{D.14})$$

El cálculo muestra por tanto que la columna tiene resistencia suficiente para el escenario de fuego considerado.

D.3 Parking abierto

D.3.1 Escenario de cálculo en fuego

Se tiene un parking abierto, con una longitud de 60 m, un ancho de 45 m y un entramado estándar de 10 m × 15 m. La altura del techo es de 3.5 m (véase la Figura D.15). Las vigas principales tienen un canto de 0.50 m. Las columnas del parking están constituidas por perfiles HEA 300. Las plazas de parking tienen las dimensiones estándar de 2.5 m × 5 m; con una superficie de 12.5 m², siendo esta superficie equivalente a un fuego localizado de 4 m de diámetro. La disposición de las vigas controla la dispersión del humo bajo el techo.

El escenario de incendio contempla la ignición de cuatro vehículos dispuestos alrededor de una misma columna. Tres de ellos son vehículos grandes, mientras que el último es una furgoneta. Esta situación es uno de los escenarios considerados por la normativa francesa. La tasa de liberación de calor correspondiente (HRR) viene dada por la Figura D.16. Para vehículos grandes, el HRR fue medido durante los ensayos realizados en Maizières-lès-Metz (Francia) en 1996, sin embargo, para la furgoneta la curva proviene de un análisis de riesgos, siendo extremadamente severa (en términos de carga de fuego, es equivalente a la combustión de 1000 kg de madera). El fuego se origina en el vehículo 1 y se propaga simultáneamente a los vehículos 2 y 3 tras 12 minutos. Pasados otros 12 minutos, el fuego se propaga también al vehículo 4.

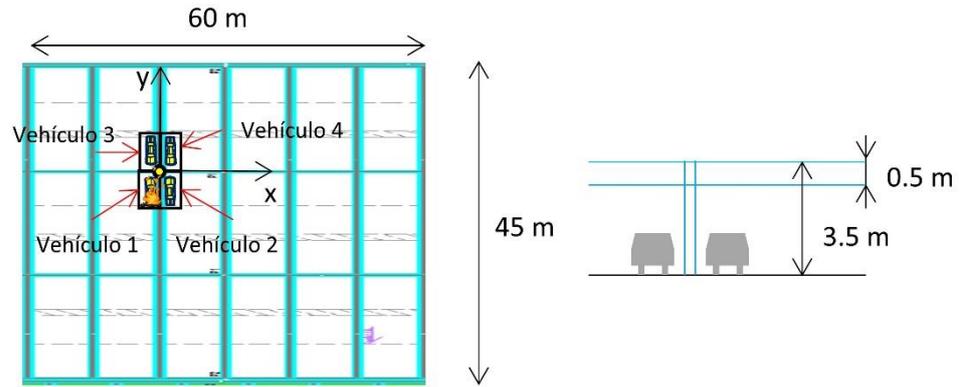


Figura D.15 Parking abierto y localización de los vehículos

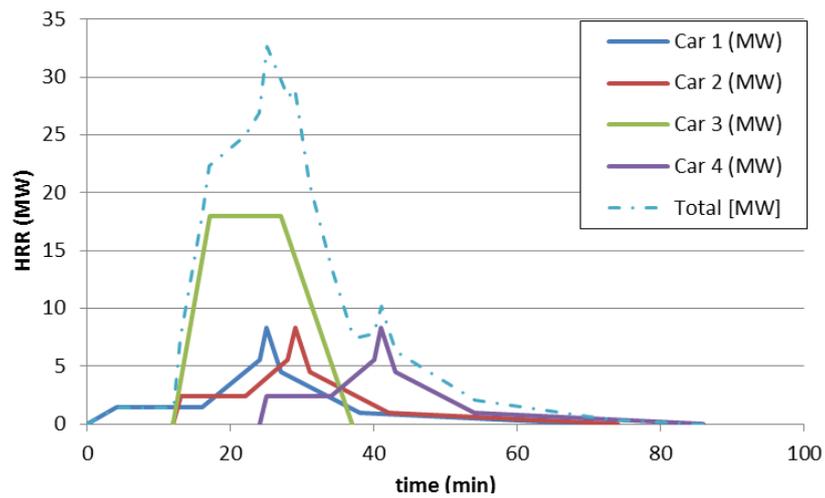


Figura D.16 Tasa de liberación de calor de los vehículos

D.3.2 Datos de entrada en OZone

En términos de datos de entrada, el usuario debe introducir los datos correspondientes a la pestaña “Fuego” y seleccionar “Fuego localizado”. La Figura D.17 detalla los datos de entrada que deben ser introducidos por el usuario:

- El número de focos de incendio (4)
- Para cada foco de incendio, su posición y curva de HRR
- La altura del compartimento (3.5 m)
- La altura de la capa de humos calientes (0.5 m)
- La cota a lo largo del eje de la columna donde el usuario desea realizar el cálculo.

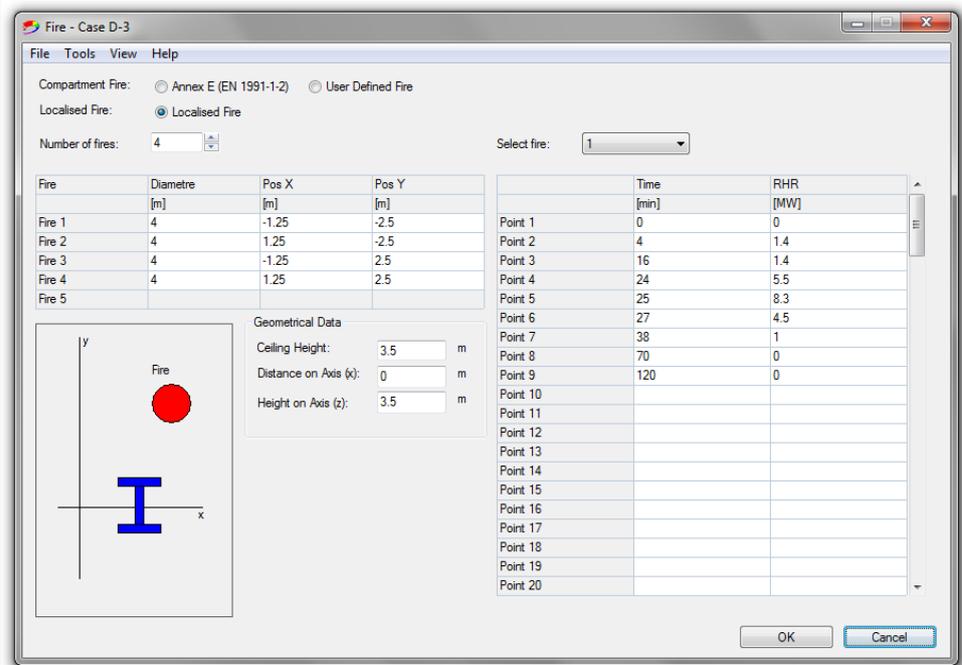


Figura D.17 Datos de entrada en la pestaña “Fuego”

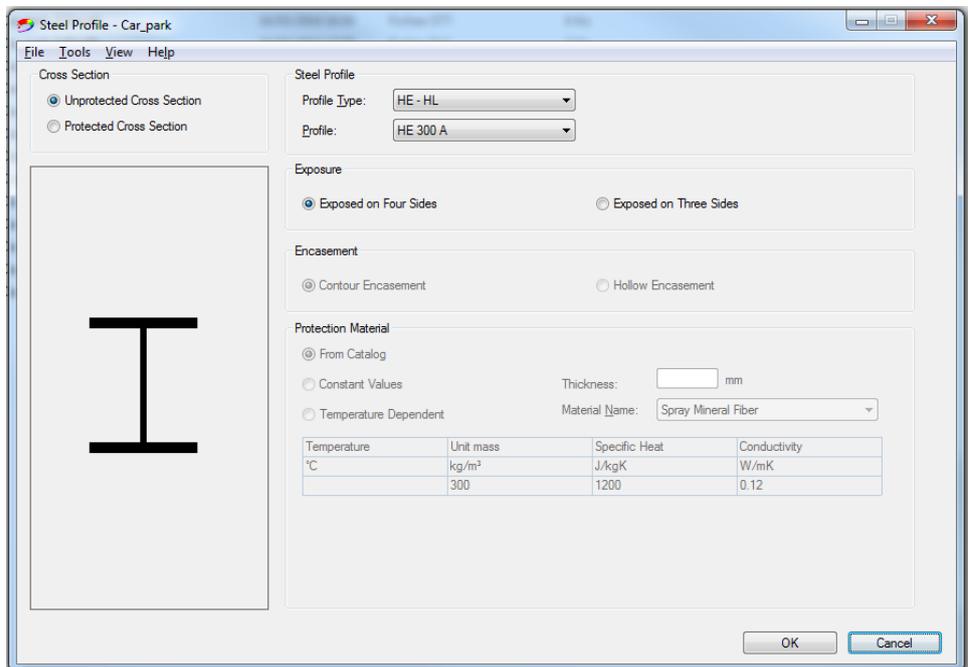


Figura D.18 Datos de entrada en la pestaña “Perfil de Acero”

A fin de calcular la temperatura de cada tramo de columna, el usuario debe definir la sección de la columna en la pestaña “Perfil de Acero” (véase Figura D.18) y después lanzar el cálculo clicando sobre el botón “Temperatura del Acero”.

OZone proporciona gráficamente la temperatura del tramo de columna deseado, además de volcar en el fichero de resultados los datos de temperatura y flujo recibido. La Figura D.19 muestra los resultados a lo largo de la columna en intervalos de 0.5 m. Fuera de la capa de humos calientes, la temperatura máxima es de 500°C a 1 m de altura, mientras que en la capa de humos calientes (entre 3.0 m y 3.5 m) se alcanzan 718°C.

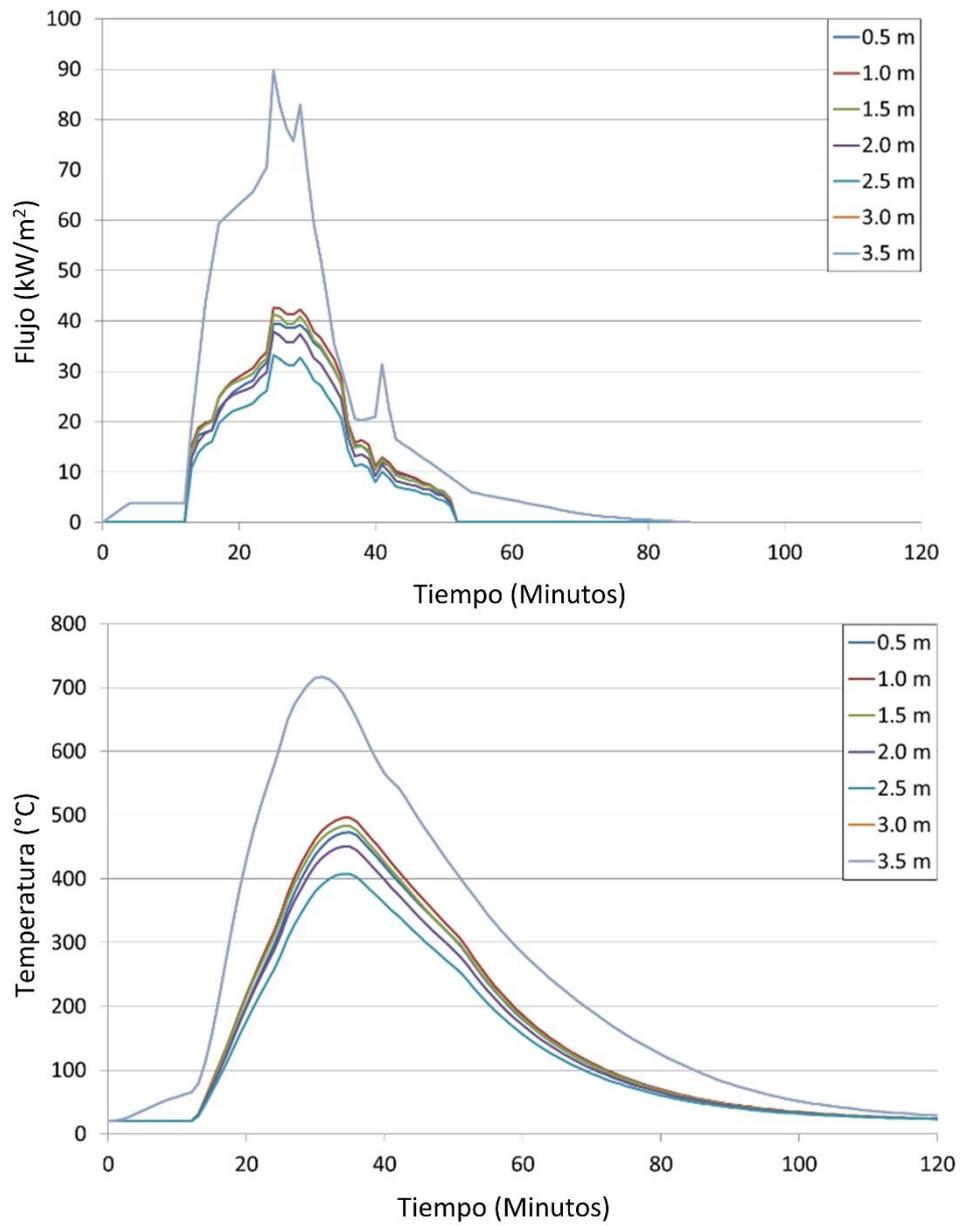


Figura D.19 Flujo de calor por radiación recibido (arriba) y temperatura (abajo)