

# DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS





# **DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS**



# DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS



universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis

decivil

universidade de aveiro  
departamento de engenharia civil

risco

universidade de aveiro  
centro de investigação de riscos  
e sustentabilidade na construção

**Publicado por:**

Universidade de Aveiro,  
Campus Universitário de Santiago  
3810-193 Aveiro  
Portugal

**Editado por:**

Paulo Vila Real  
Nuno Lopes

**Fotografia da capa:**

Um ensaio de incêndio localizado realizado na  
Universidade de Ulster.

**Créditos das Fotografias:**

Salvo indicação em contrário, as fotografias foram fornecidas pelos membros do consórcio LOCAFI.

Este manual de dimensionamento é uma tradução para português da publicação P423 do SCI (The Steel Construction Institute) realizada por Margarida Ferreira, sob supervisão do Prof. Paulo Vila Real e do Prof. Nuno Lopes da Universidade de Aveiro.

Dezembro, 2018  
ISBN: 978-989-20-9009-2

# PREÂMBULO

Esta publicação foi produzida como parte do Projeto *Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localised fire – Valorisation (LOCAFI-plus)* (contrato 754072) do Fundo de Investigação do Carvão e do Aço da União Europeia.

As organizações que participaram no projeto LOCAFI-plus foram:

<b>Arcelormittal Belval &amp; Differdange SA</b> Luxemburgo (Coordenador)	<b>Tallinna Tehnikaulikool</b> Estónia
<b>Centre Technique Industriel de la Construction Métallique</b> França	<b>Univerza V Ljubljani</b> Eslovénia
<b>Universitatea Politehnica Timisoara</b> Roménia	<b>Instytut Techniki Budowlanej</b> Polónia
<b>Universite de Liège</b> Bélgica	<b>Universitat Politecnica de Valencia</b> Espanha
<b>University of Ulster</b> UK	<b>Technicka Univerzita V Kosiciach</b> Eslováquia
<b>Universita Degli Studi Di Trento</b> Itália	<b>Staalinfocentrum – Infosteel</b> Bélgica
<b>Ceske Vysoke Uceni Technicke V Praze</b> República Checa	<b>Miskolci Egyetem</b> Hungria
<b>Stichting Bouwen met Staal</b> Países Baixos	<b>Tampere University of Technology</b> Finlândia
<b>Universidade de Aveiro</b> Portugal	<b>The Steel Construction Institute</b> UK
<b>Bauforumstahl ev</b> Alemanha	<b>RISE Swedish Research Institute</b> Suécia

Para a preparação desta publicação foram recebidas valiosas contribuições das seguintes pessoas:

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

Os nomogramas foram desenvolvidos pelo CTICM.

Agradece-se o apoio financeiro do Research Fund for Coal and Steel.



# ÍNDICE

	PREÂMBULO	ii
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Âmbito deste manual de dimensionamento	1
1.2	Os Eurocódigos	1
1.3	Regulamentação nacional em engenharia de segurança contra incêndio baseada no desempenho	2
2	INTRODUÇÃO À ENGENHARIA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	3
2.1	Dimensionamento contra o colapso e necessidade de proteção ao fogo	3
2.2	Dimensionamento segundo os Eurocódigos	4
3	INCÊNDIOS LOCALIZADOS	9
3.1	Estudos existentes e implementação no Eurocódigo	9
3.2	Testes e calibração	10
4	NOVO MODELO PARA CARGAS DE INCÊNDIO EM COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS	19
4.1	Princípios e campo de aplicação	19
4.2	Ferramentas de cálculo para modelar fluxos de calor de incêndios localizados	21
4.3	Determinação da temperatura de um segmento da coluna de aço	27
5	DIMENSIONAMENTO DA COLUNA	31
5.1	Verificação	31
5.2	Carga	31
5.3	Resistência	32
5.4	Cálculo da resistência ao fogo através de análise por elementos finitos	35
6	REFERÊNCIAS	37
	ANEXO A MODELO PARA CÁLCULO DA CARGA DE INCÊNDIO EM COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS	39
A.1	Generalidades	39
A.2	Coluna fora da área de incêndio	39
A.3	Coluna no interior da área de incêndio	49
A.4	Fluxo de calor total recebido por um segmento da coluna	50
	ANEXO B APLICAÇÃO A COLUNA FORA DA ÁREA DE INCÊNDIO	53
	62	
	ANEXO C NOMOGRAMAS	63
	ANEXO D EXEMPLOS DE Aplicação	89
D.1	Edifício industrial	89
D.2	Edifício de escritórios	92
D.3	Parque de estacionamento aberto	100



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Âmbito deste manual de dimensionamento

Este manual de dimensionamento apresenta um método para determinar a temperatura de uma coluna sujeita a um incêndio localizado. A abordagem foi desenvolvida de acordo com os Eurocódigos. Também são fornecidas orientações de como determinar a resistência de uma coluna de aço quando sujeita a elevadas temperaturas. A utilização da abordagem baseada no desempenho para determinar a resistência estrutural ao fogo geralmente levará a uma redução no custo da proteção ao fogo em comparação com o que é exigido através de uma abordagem prescritiva.

O manual inclui os seguintes conteúdos:

- Uma introdução geral à engenharia de segurança contra incêndio, incluindo a seleção dos cenários de modelação e técnicas de cálculo.
- Orientações específicas para o dimensionamento em situação de incêndio localizado, incluindo um resumo do trabalho de investigação realizado como parte do projeto Europeu de investigação LOCAFI.
- Um novo modelo de dimensionamento para incêndios localizados.
- Uma descrição das ferramentas de dimensionamento disponíveis para modelar incêndios localizados, desde análises simplificadas utilizando nomogramas, até sofisticados modelos de elementos finitos.
- Um resumo do método de cálculo de colunas em aço em situação de incêndio do Eurocódigo 3, que pode ser utilizado com o modelo de análise de temperaturas para determinação da resistência da coluna.
- Exemplos de cálculo, demonstrando a utilização do modelo no cálculo em cenários realísticos.

## 1.2 Os Eurocódigos

Os Eurocódigos são uma série de 10 Normas Europeias, EN 1990 - EN 1999, que fornecem uma abordagem comum para o dimensionamento de edifícios e outras obras de engenharia civil e produtos de construção. Quando se considera a resistência ao fogo de um elemento em aço ou misto aço-betão, são relevantes os seguintes Eurocódigos:

- NP EN 1990:2009 Eurocódigo 0. Bases para o Projeto de Estruturas <sup>[1]</sup>
- NP EN 1991-1-2:2010 Eurocódigo 1. Ações em Estruturas. Ações em estruturas expostas ao fogo<sup>[2]</sup>
- NP EN 1993-1-2:2010 Eurocódigo 3. Projeto de Estruturas em Aço. Regras gerais. Verificação da resistência ao fogo<sup>[3]</sup>
- NP EN 1994-1-2:2011 Eurocódigo 4. Projeto de estruturas mistas aço-betão. Regras gerais. Verificação da resistência ao fogo<sup>[4]</sup>

Cada um destes Eurocódigos é acompanhado por um Anexo Nacional que, quando apropriado, irá:

- Especificar o valor de um fator (designado por Parâmetro Determinado a nível Nacional),
- Especificar o método de dimensionamento a utilizar,

- Indicar um anexo informativo que possa ser utilizado.

Adicionalmente, o Anexo Nacional pode indicar referências de publicações que contenham Informação Complementar Não Contraditória (ICNC) que irão auxiliar o projetista. As orientações dadas no Anexo Nacional aplicam-se a estruturas que são construídas nesse país. Os Anexos Nacionais diferem entre os países da Europa.

### **1.3 Regulamentação nacional em engenharia de segurança contra incêndio baseada no desempenho**

A compreensão das desvantagens e limitações de uma abordagem baseada no desempenho na engenharia de segurança contra incêndio tem melhorado nos últimos anos. Contudo, na Europa existe uma variação considerável nos regulamentos nacionais relacionados com a segurança contra incêndios na construção. Por esta razão, é essencial que o projetista esteja ciente da legislação relevante do país onde a estrutura se irá construir, e que se envolva com a entidade competente de verificação e aprovação na fase apropriada de projeto.

Para auxiliar, orientações dos passos requeridos para obter aprovação utilizando abordagens baseadas no desempenho no âmbito da segurança contra incêndios em diferentes países da Europa estão disponíveis em: <http://research.bauforumstahl.com/>.

O link direto para aceder aos documentos do projeto LOCAFIplus é: <https://research.bauforumstahl.de/en/fire-safety/locafi-temperature-assessment-of-a-vertical-member-subjected-to-localised-fire/>

## 2 INTRODUÇÃO À ENGENHARIA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

O fogo representa uma grave ameaça à vida humana. É fundamental que os edifícios sejam dimensionados e construídos para que, em caso de incêndio, a sua estabilidade se mantenha por um período de tempo suficientemente longo que permita a evacuação dos ocupantes e a iniciação das medidas de contenção do incêndio. A engenharia de segurança contra incêndio é a aplicação de princípios científicos ao projeto de estruturas para garantir a segurança dos ocupantes em todos os cenários previstos.

A engenharia de incêndio compreende um amplo conjunto de questões incluindo:

- Em primeiro lugar a minimização dos riscos de ativação do incêndio,
- Restrição do incêndio ao seu ponto de ignição, i.e., impedir a propagação do incêndio a outras partes do edifício ou outras estruturas,
- Fornecimento de medidas de combate a incêndio por exemplo *sprinklers*,
- Fornecimento de proteção estrutural em situação de incêndio, de forma a que seja prevenido o colapso da estrutura,
- Compreensão do comportamento humano em situação de incêndio por exemplo a resposta a alarmes, capacidade de encontrar caminhos seguros de evacuação, etc.

Dotar a estrutura de um edifício de medidas para minimizar o impacto do fogo pode representar um significativo custo da estrutura. O sobredimensionamento das medidas de proteção contra a incêndio pode conduzir a estruturas não económicas. É necessário encontrar uma solução equilibrada que forneça proteção adequada contra os cenários de incêndio de projeto a um custo mínimo para o dono de obra.

Para mais informação de engenharia de segurança contra incêndio, recomendam-se as seguintes publicações<sup>[5,6,7,8]</sup>.

Este manual de dimensionamento apresenta um método para estimar a evolução da temperatura numa coluna sujeita a um incêndio localizado. Conhecida a temperatura, pode-se determinar a resistência da coluna. Como explicado na Secção 2.2, esta abordagem de engenharia de segurança contra incêndio baseada no desempenho pode levar a uma significativa redução na proteção contra incêndio, e consequentemente do custo, comparado com o que se obtém através de uma abordagem prescritiva.

### 2.1 Dimensionamento contra o colapso e necessidade de proteção ao fogo

Prevenir o colapso é um dos objetivos principais da engenharia de segurança contra incêndio. O colapso representa uma perda repentina e catastrófica de estabilidade da estrutura, e quando ocorre, na maior parte das vezes, resulta na morte de todos os ocupantes presentes no edifício, quer sejam utilizadores do edifício ou pessoal de combate a incêndio.

Geralmente o colapso de um edifício é prevenido através da proteção dos elementos estruturais. A proteção passiva contra o fogo assume vulgarmente uma das duas formas, não reativa (por exemplo, placas ou *sprays*) e reativa (revestimentos

intumescentes). As placas rígidas de materiais cimentícios, com alta densidade e baixa condutividade térmica, permitem a proteção contra incêndio dos elementos estruturais. A proteção térmica pode também ser efetuada através da utilização de materiais cimentícios projetados.

Os revestimentos intumescentes são materiais semelhantes a pinturas que são inertes a baixas temperaturas, mas fornecem isolamento a temperaturas de cerca de 200-250°C como resultado de uma complexa reação química. A estas temperaturas as propriedades do aço não são afetadas. Como resultado dessa reação a camada expande e fornece uma camada expandida com baixa condutividade.

O efeito isolante através de placas, ou sistemas projetados ou pintados tende a ser proporcional à espessura do material fornecido. Portanto, é mais conservativo fornecer uma proteção ao fogo maior do que o exigido. No entanto, essa possibilidade aumenta o custo.

Em muitos casos verifica-se que a estrutura é capaz de se manter funcional sem ser utilizada proteção contra incêndio.

A seleção da espessura do material de proteção ao fogo requer a consideração dos seguintes fatores:

- (a) A severidade do fogo, e a avaliação do aumento da temperatura no elemento;
- (b) As propriedades do material de proteção ao fogo;
- (c) A temperatura que o elemento protegido pode atingir antes de ocorrer o colapso, definida como 'temperatura crítica'.

As regras para determinação da resistência estrutural em situação de incêndio são indicadas nos Eurocódigos (Secção 5).

## **2.2 Dimensionamento segundo os Eurocódigos**

Um completo dimensionamento em situação de incêndio necessita da utilização simultânea de vários Eurocódigos. A cláusula 2.1 da NP EN 1991-1-2:2010 estabelece as quatro fases principais a ter em conta numa análise estrutural para a verificação da resistência ao fogo:

- Seleção dos cenários de incêndio relevantes,
- Determinação dos correspondentes incêndios de cálculo,
- Cálculo da evolução da temperatura no interior dos elementos estruturais,
- Cálculo do comportamento mecânico da estrutura exposta ao fogo, utilizando a NP EN 1993-1-2:2010 para estruturas de aço.

### **2.2.1 Cenários de incêndio de cálculo**

A cláusula 2.2 da NP EN 1991-1-2:2010 descreve o processo de seleção do cenário de incêndio de cálculo.

Uma abordagem prescritiva para a engenharia de segurança contra incêndio envolve muitas vezes a utilização da curva temperatura-tempo padrão. Esta é uma das três curvas nominais temperatura-tempo fornecidas pelo Eurocódigo e pretende modelar o aumento da temperatura num incêndio totalmente desenvolvido num compartimento (Secção 2.2.2 deste documento).

A maioria das estruturas dos edifícios de escritórios apresentam dimensão e forma idêntica e a abordagem prescritiva de segurança contra incêndios é considerada suficiente. A espessura da proteção contra incêndio é determinada assumindo que os

elementos estão envolvidos no incêndio seguindo a curva temperatura-tempo padrão, e depende das dimensões da secção e da resistência ao fogo requerida.

Contudo, para certos tipos de estruturas tais como aeroportos e outros grandes edifícios abertos e de grandes dimensões, a aplicação da curva temperatura-tempo padrão nem sempre é apropriada; o cálculo baseado no incêndio natural conduzirá a projetos mais próximos da realidade e geralmente mais económicos. Isto é conhecido como uma abordagem baseada no desempenho de segurança contra incêndio e requer tanto o conhecimento do material que pode provocar o fogo quanto a dimensão e características de ventilação do compartimento em que o incêndio acontece. A seleção do cenário de incêndio de cálculo e as técnicas de modelação são importantes para garantir a adequabilidade do projeto.

### 2.2.2 Incêndio totalmente desenvolvido

Um incêndio totalmente desenvolvido num compartimento ocorre quando se dá a inflamação simultânea de todo o material combustível de um espaço específico, acontecendo no instante designado por *'flashover'*. Nesta circunstância é razoável assumir que a temperatura no interior do compartimento é uniforme em todo o compartimento. A Figura 2.1 apresenta um exemplo de um incêndio totalmente desenvolvido.



Créditos da fotografia: Universidade Técnica Checa em Praga

**Figura 2.1** Incêndio totalmente desenvolvido num compartimento

#### 2.2.2.1 Curva temperatura-tempo padrão

A variação de temperatura no interior de um compartimento no tempo pode ser descrita utilizando a curva temperatura-tempo padrão indicada na NP EN 1991-1-2:2010. A curva é apenas uma curva de referência e não se destina a representar nenhum cenário de incêndio específico. Na maioria das situações verifica-se ser muito conservativa comparada com dados registados. Não é tida em conta a diminuição de temperatura à medida que o material combustível se extingue.

A curva temperatura-tempo padrão é expressa por:

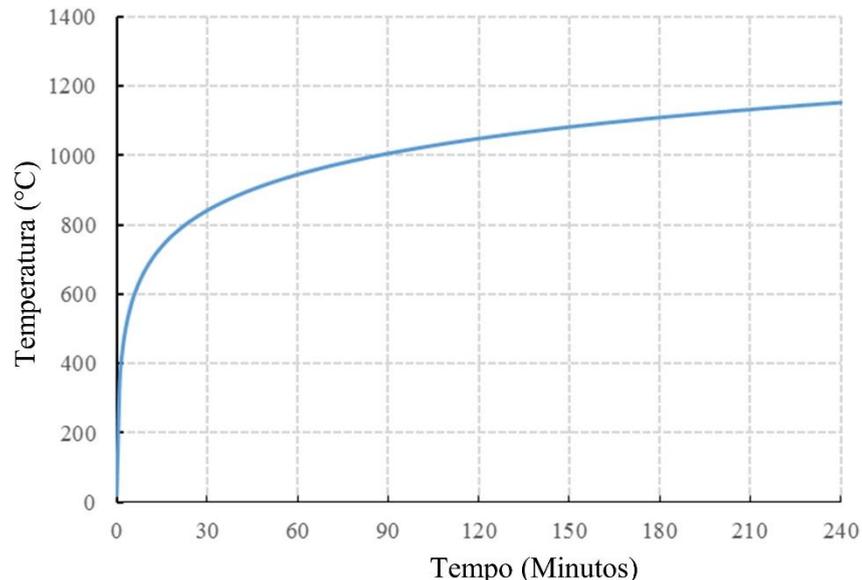
$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

Onde:

$\theta_g$  é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio

$t$  é o tempo, medido em minutos

A Figura 2.2 representa a relação temperatura vs. tempo definida pela curva de incêndio padrão.



**Figura 2.2 Curva de incêndio padrão ISO 834**

### 2.2.2.2 Outras abordagens de cálculo em situação de incêndio

A utilização da curva temperatura-tempo padrão conduz a proteção contra incêndio que é economicamente aceitável para a maioria das estruturas. No entanto, alguns projetos podem justificar uma análise mais detalhada e realística, que pode resultar numa redução das temperaturas de cálculo.

A gravidade de um incêndio num compartimento é influenciada por vários fatores, incluindo:

- Tipo, densidade e distribuição do material combustível,
- Dimensão e geometria do compartimento
- Condições de ventilação e fluxo do ar

A curva temperatura-tempo para o compartimento pode alternativamente ser determinada a partir de modelos de incêndios naturais, como o modelo paramétrico temperatura-tempo (indicado na NP EN 1991-1-2:2010 Anexo A), um modelo de zona (indicado na NP EN 1991-1-2:2010 Anexo D) ou um modelo computacional de dinâmica dos fluidos (CFD) (ver 2.2.4 para mais detalhes). Estes modelos permitem calcular a temperatura dos gases no compartimento em função da geometria do compartimento, condições de ventilação, propriedades térmicas dos revestimentos da envolvente do compartimento, da taxa de libertação de calor e da densidade da carga de incêndio. Note-se que a utilização do Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010 não é permitida pelo Anexo Nacional de vários países.

### **2.2.3 Incêndios localizados**

O cenário de incêndio num compartimento assume que a temperatura no compartimento aumenta uniformemente. Em compartimentos que são relativamente pequenos e onde a carga de incêndio está uniformemente distribuída, esta consideração é razoavelmente realística. Contudo, à medida que o tamanho do compartimento aumenta ou se a carga de incêndio está localizada numa área relativamente pequena, esta suposição tende a tornar-se cada vez mais conservativa. Nesses casos, uma abordagem que tenha em conta a variação da temperatura com a localização do incêndio pode produzir resultados significativamente menos conservativos, embora a análise necessária para obter o perfil de temperatura seja consideravelmente mais complexa.

A Secção 3 foca-se na análise utilizando modelos de incêndio localizados.

### **2.2.4 Dinâmica de fluidos computacional (CFD)**

Um incêndio apresenta uma mistura complexa de fenómenos físicos o que significa que nem sempre as abordagens simplificadas podem ser utilizadas para reproduzir com precisão as temperaturas associadas ao cenário de incêndio de cálculo. Nesses casos, modelos sofisticados de cálculo baseados em CFD podem fornecer melhores representações do incêndio. Os modelos CFD podem ser utilizados para todos os cenários de incêndio concebíveis, incluindo incêndios totalmente desenvolvidos, incêndios localizados, incêndios no exterior de edifícios, etc.

A reprodução dos fenómenos físicos necessários para reproduzir com precisão um incêndio é extremamente difícil. Em particular a turbulência não pode ser calculada com total precisão em qualquer escala; em vez disso, uma série de modelos semi-empíricos são geralmente usados para obter aproximações dos efeitos globais. Existe uma grande gama de modelos sendo necessário realizar-se uma escolha cuidadosa do modelo mais apropriado para a situação em estudo. Por estas razões, normalmente os modelos CFD apenas são aplicados por especialistas.

Uma útil introdução às técnicas CFD para modelação de incêndios pode ser encontrada no *Guide to the advanced fire safety engineering of structures*<sup>[9]</sup>.



## 3 INCÊNDIOS LOCALIZADOS

Como discutido no início da Secção 2, as regras prescritivas para o cálculo em situação de incêndio geralmente consideram um incêndio totalmente desenvolvido no compartimento, com uma temperatura uniforme no interior do compartimento. Esta consideração tende a ser particularmente onerosa para grandes compartimentos. A abordagem baseada no desempenho permite ao projetista ter em conta o comportamento real dos incêndios, que podem muitas vezes ser altamente localizados. Nesses casos, a compreensão do comportamento dos incêndios localizados, e como eles afetam outras áreas do compartimento, é essencial.

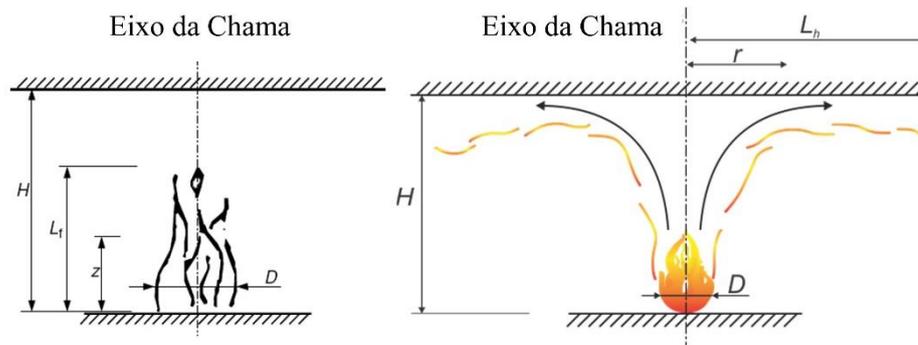


**Figura 3.1** Teste laboratorial de uma coluna sujeita a um fogo localizado

### 3.1 Estudos existentes e implementação no Eurocódigo

A abordagem baseada no desempenho para fogos localizados é indicada no Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010<sup>[2]</sup>. Este anexo fornece um método para calcular o comprimento da chama e a temperatura da pluma de um incêndio localizado. É baseado nos estudos de Heskestad<sup>[10]</sup> e Hasemi<sup>[11]</sup>, que fornecem uma correlação entre o tamanho do incêndio (definido pela taxa de libertação de calor e pelo diâmetro) e outros parâmetros, incluindo a altura da chama e temperatura interna do incêndio.

Incêndios que atingem o teto tendem a espalhar-se numa direção radial. O modelo tem em consideração essa dispersão quando calcula a distribuição da temperatura no interior do compartimento. A Figura 3.2 representa as duas situações.



**Figura 3.2 Principais parâmetros para representar um incêndio localizado (esquerda: o incêndio não atinge o teto, direita: o incêndio atinge o teto)**

O Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010 não fornece um método para obtenção da temperatura ou do fluxo de calor recebido por um elemento a determinada distância do incêndio. Para além disso, o método do Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010 considera a emissividade da chama igual a 1.0, o que tende a produzir resultados mais conservativos quando comparados com resultados de ensaios. Através do projeto LOCAFI do Fundo de Investigação do Carvão e do Aço da União Europeia (*Research Fund for Coal and Steel – RFCS*), foram realizados trabalhos para melhorar a metodologia de incêndios localizados do Anexo C. Através de uma série de testes, e subsequentemente trabalho numérico e de análise, foram propostos melhoramentos, incluindo-se as suas limitações.

O modelo melhorado é descrito na Secção 4 e apresentado em detalhe no ANEXO A deste documento. A Secção 3.2 descreve os testes que foram realizados para calibrar e verificar este modelo.

## 3.2 Testes e calibração

Esta secção descreve os testes que foram realizados para desenvolver e melhorar o modelo térmico para incêndios localizados. Todos os detalhes podem ser consultados nos resultados do projeto LOCAFI, como referido no texto.

### 3.2.1 Testes na realizados na Universidade de Liège

O primeiro grupo de testes do projeto LOCAFI foram realizados na Universidade de Liège. Foi realizado um total de 24 testes de recipiente único. Todos os detalhes podem ser encontrados na *Deliverable 6* do projeto LOCAFI<sup>[12]</sup>.

Foram utilizados dois tipos de combustíveis líquidos, sendo os testes realizados de forma a obter-se a mesma taxa de libertação de calor (HRR). Os líquidos utilizados foram N-Heptano e Diesel.

Os testes foram realizados com e sem uma coluna no centro da piscina de fogo. A presença da coluna não aparentou ter um efeito significativo na HRR.



**Figura 3.3** Recipiente de 2 m de diâmetro, mostrando o mecanismo de alimentação de combustível (retirado de LOCAFI *Deliverable 15*<sup>[13]</sup>)

O combustível líquido foi colocado em recipientes de 5 diâmetros diferentes, desde 600 mm até 2200 mm. Cada diâmetro foi testado com ambos os combustíveis N-Heptano e Diesel, em configurações idênticas. Ao contrário dos testes descritos na seção 3.2.2, o combustível foi fornecido ao recipiente numa taxa fixa, em vez de se iniciar o teste com o volume total de combustível no recipiente. Este mecanismo de controle permitiu que a HRR se mantivesse constante e a cerca de 500 kW/m<sup>2</sup>.

A HRR para os testes de Liège foi calculada através da Equação (3.1), onde a densidade do combustível (kg/m<sup>3</sup>)  $\rho$  é 680 (heptano) ou 840 (diesel) e a entalpia da combustão (kJ/kg)  $\Delta H_c$  é 44600 (heptano) ou 43200 (diesel)<sup>[20]</sup>.

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

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos testes realizados.

**Tabela 3.1** Resumo dos testes realizados na Universidade de Liège

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

### 3.2.2 Testes realizados no FireSERT (Universidade de Ulster)

Foram realizados 52 testes no FireSERT (Universidade de Ulster), compreendendo um largo conjunto de dimensões do incêndio e localizações. Os testes foram divididos em 2 séries; testes sem teto (Tabela 3.2) e testes com teto (Tabela 3.3).

Todos os detalhes dos testes podem ser consultados na *Deliverable 7* do projeto LOCAFI<sup>[14]</sup>.

#### 3.2.2.1 Testes de incêndio sem teto

Foram realizados 31 testes como parte da primeira fase do trabalho (Tabela 3.2). Foi variada a distância entre a coluna e o incêndio com o objetivo de se estudar diferentes cenários de carga de incêndio e localizações. As cargas de combustível foram variadas através do tipo de combustível (Diesel, Querosene e paletes de madeira), dimensão geral do incêndio (número e tamanho dos recipientes) e posição. Foram utilizadas diferentes colunas de aço, permitindo avaliar o efeito da variação da forma do aço ou dimensão nas temperaturas e nos fluxos medidos. Também foi medida a HRR para os diferentes combustíveis para melhorar e ampliar o Anexo C da EN 1991-1-2.

Foi observada uma discrepância entre os valores de HRR medidos e os valores de HRR que eram esperados para as combinações de dimensão do incêndio e combustível testados. Foi aplicada uma correção aos valores medidos por propósitos

de modelação numérica, como discutido na LOCAFI *Deliverable 8-9*<sup>[16]</sup>. A Tabela 3.2 e Tabela 3.3 apresentam as medições originais e os valores corrigidos.

**Tabela 3.2 Resumo dos testes realizados no FireSERT, sem teto**

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

A Figura 3.4 apresenta dois dos testes. A fotografia da esquerda mostra os recipientes utilizados para colocar o combustível líquido, que restringe o diâmetro do incêndio.



**Figura 3.4** Configuração dos testes para incêndios localizados realizados no FireSERT (esquerda: recipientes para conter o combustível líquido, direita: grades de madeira)

### 3.2.2.2 Testes de incêndio com teto

Foram realizados 21 testes adicionais como parte da segunda fase do trabalho. Como na primeira parte, foi variada a dimensão do incêndio e a sua localização dentro do compartimento. Esta série de testes é resumida na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** Resumo dos testes realizados no FireSERT, com teto

Teste Número	Fuel	Diâmetro	HRR (kW)	
			Medida	Corregida
Teto - O21	Querosene	0.7 m	739	563
Teto - O22	Querosene	0.7 m	759	575
Teto - O23	Querosene	0.7 m	814	511
Teto - O24	Querosene	0.7 m	763	607
Teto - O25	Querosene	0.7 m	476	512
Teto - O26	Querosene	1.6 m	3653	2885
Teto - O27	Diesel	0.7 m	515	496
Teto - O28	Diesel	0.7 m	397	468
Teto - O29	Diesel	0.7 m	633	490
Teto - O30	Diesel	0.7 m	614	472
Teto - O31	Querosene	0.7 m × 2	1420	1074
Teto - O32	Diesel	0.7 m × 2	1185	952
Teto - O33	Madeira	0.5 m cubo	440	295
Teto - O34	Madeira	0.5 m cubo	400	273
Teto - O35	Madeira	0.5 m cubo × 2	702	666
Teto - O36	Madeira	1 × 1 × 0.5 m	1410	1870
Teto - O37	Querosene	0.7 m × 4	3215	2506
Teto - O38	Madeira	1 × 1 × 0.5 m	1788	2253
Teto - O39	Diesel	1.6 m	-	-
Teto - O40	Querosene	0.7 m	-	-
Teto - O41	Madeira	1 × 1 × 0.5 m	-	-

A Figura 3.5 mostra a chama do teste ‘Teto - O38’ em que o impacto da chama no teto é claramente visível.



**Figura 3.5** O incêndio atinge o teto

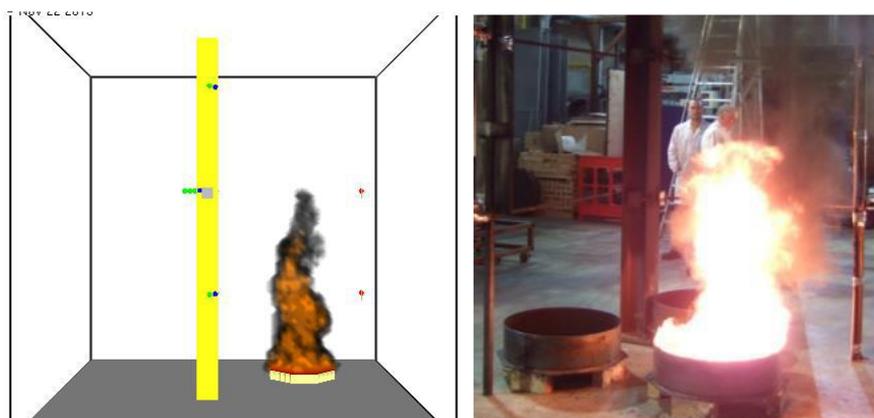
### **3.2.3 Modelação numérica**

Como suporte aos ensaios, foi realizado um estudo numérico. O principal objetivo do trabalho numérico era explorar a base de dados para situações fora do âmbito dos testes experimentais, incluindo incêndios de diâmetro crescente que podem ser perigosos de ensaiar experimentalmente.

Para o trabalho numérico foi utilizado o *software Fire Dynamics Simulator (FDS)*<sup>[15]</sup>, que simula a transferência de calor de um incêndio baseado em CFD. A Figura 3.6 compara a fotografia de uma chama de um teste com a chama prevista utilizando o *software FDS*.

O fogo é um fenómeno dinâmico e variável, que é muito difícil de prever computacionalmente. Portanto o *software FDS* requer vários parâmetros de entrada, muitos dos quais dependem de circunstâncias particulares relacionadas com cada teste específico. Os parâmetros do modelo incluem eficiência da combustão, produção de fuligem, parcela perdida de radiação, modelo e parâmetros de

turbulência e o número de ângulos de radiação. Os parâmetros de entrada mais importantes são descritos nas seções seguintes.



**Figura 3.6** Comparação entre a forma da chama prevista através de FDS e uma fotografia do teste, para o teste Coluna I2 - I11 <sup>[16]</sup> do FireSERT

### 3.2.3.1 Modelo de turbulência

A correta reprodução da turbulência (mudanças caóticas na pressão e na velocidade do fluido) é uma parte fundamentalmente importante na maioria dos problemas de CFD. No fogo, a turbulência tende a alterar-se com a altura e posição da chama no tempo. A reprodução dos processos físicos relacionados com a turbulência está para além da capacidade de qualquer modelo computacional existente neste momento. Apesar disso, programas como o FDS utilizam algoritmos de aproximação global, em que cada um dos quais pode ter para diferentes situações diferentes vantagens e desvantagens, dependendo das condições fronteira do problema. O programa FDS 5 utiliza o relativamente antigo, mas bem estabelecido modelo ‘Smagorinsky’ enquanto que o modelo FDS 6 permite a seleção de vários outros modelos de turbulência, incluindo o modelo ‘Smagorinsky dinâmico’, o modelo ‘Vreman’ e o modelo ‘Deardoff’<sup>[17]</sup> (que é selecionado por defeito).

Vários estudos paramétricos foram realizados para explorar a variação nas temperaturas obtidas quando cada um dos diferentes modelos era utilizado. Os estudos também avaliaram o efeito de variar os parâmetros que regulam o comportamento dentro de cada algoritmo que compõem o modelo. A conclusão final do estudo foi que o modelo ‘Smagorinsky Constante’ produz os resultados mais consistentes com os ensaios, com a constante de Smagorinsky igual a 0,1.

Os projetistas que pretendam aplicar soluções CFD devem estar seguros que a escolha do modelo de turbulência pode afetar significativamente os resultados numéricos.

### 3.2.3.2 Parcela de radiação

A parcela de radiação representa a fração de energia libertada pelo fogo como radiação térmica, em oposição a ser libertada através de convecção. Como explicado na Secção 13.1.1 do *FDS User Guide*<sup>[15]</sup>, a verdadeira proporção de radiação libertada é uma função da temperatura da chama e da composição química, sendo que, nenhum dos dois parâmetros pode ser calculado pelo programa com uma resolução suficientemente alta para que o resultado seja preciso. Em vez disso, o programa utiliza um valor global calibrado.

Por predefinição, o programa FDS utiliza um valor de 0,35, i.e. 35% do calor é transferido por radiação e 65% transferido por convecção. Também foram testados

outros valores para a fração de radiação, resultando em diferentes balanços entre o calor transferido por radiação e convecção. O melhor ajuste foi obtido para o valor predefinido.

### 3.2.3.3 Ventos laterais

As simulações numéricas são geralmente baseadas em compartimentos estanques às ações exteriores, significando que o ar sobe verticalmente, e que as chamas são verticais. Em condições reais, esta suposição raramente é verdadeira, o que faz com que o menor movimento de ar muitas vezes cause 'inclinação' da chama. Muitos dos testes descritos nas Secções 3.2.1 e 3.2.2 mostram uma inclinação significativa; um exemplo é apresentado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 Teste O36, apresentando a inclinação da chama**

Embora não sendo sistematicamente medido durante os testes, a inclinação da chama era claramente visível. Assim, a inclusão do vento foi fundamental para alcançar um elevado grau de correção no modelo de calibração.

### 3.2.4 Principais resultados

Os testes realizados no âmbito do projeto LOCAFI forneceram um vasto conjunto de dados para configurações que atualmente não são abrangidas pelo Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010.

Os testes realizados na Universidade de Liège focaram-se em configurações onde a coluna estava envolvida na chama. Foi investigada a influência da presença da coluna na altura da chama e nas temperaturas a diferentes níveis, através dos quais se demonstrou que a presença da coluna provoca uma chama mais alta. Contudo, a altura da chama e as temperaturas ao longo do eixo vertical previstas pela NP EN 1991-1-2:2010 continuam do lado da segurança com ou sem a coluna na zona da chama (zona combustível) e na zona da pluma (zona não combustível).

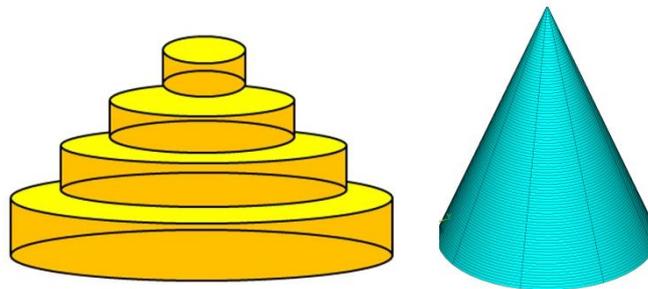
Os testes realizados na Universidade de Ulster focaram-se em configurações onde as colunas estavam localizadas fora do fogo. Estes testes demonstraram que a altura da chama e as temperaturas ao longo do eixo vertical da chama previstas segundo a NP EN 1991-1-2 estão do lado da segurança. Para além disso, estes testes forneceram um vasto conjunto de dados que serviram para a calibração do método de previsão do fluxo de calor recebido por uma coluna localizada fora do fogo. Os testes, realizados considerando a existência ou não de teto, mostram que o vento tem uma forte influência nas temperaturas e nos fluxos de calor medidos perto da fonte de incêndio, enquanto que o fluxo recebido num local afastado do incêndio não é afetado.

## 4 NOVO MODELO PARA CARGAS DE INCÊNDIO EM COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS

### 4.1 Princípios e campo de aplicação

Foi desenvolvido um novo modelo para incêndios localizados, baseado nos resultados dos testes do programa descritos na Secção 3. O novo modelo foi verificado através dos fluxos de calor medidos nos ensaios, e confirmou-se fornecer resultados conservativos aceitáveis em todos os casos.

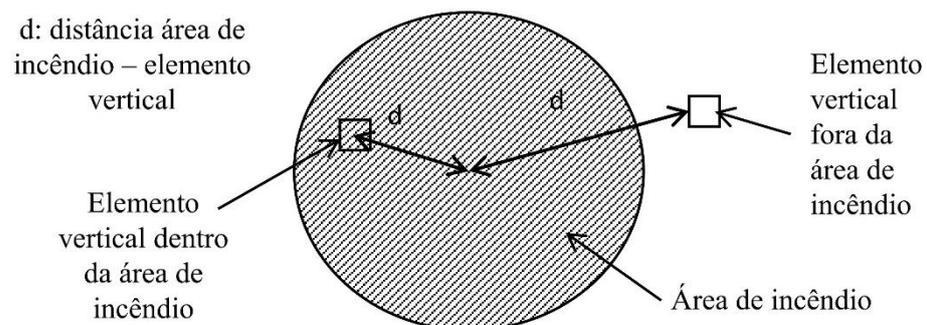
O principal conceito é a discretização do fogo numa chama sólida virtual, construída por cilindros e anéis na sua forma mais simples ou formas suaves em modelação avançada (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Modelação de um incêndio localizado utilizando uma discretização cilíndrica ou cônica

O fluxo de radiação proveniente da chama sólida virtual pode ser calculado em qualquer ponto do espaço utilizando técnicas padronizadas de modelação de transferência de calor por radiação. Conhecido o fluxo, pode ser determinada a temperatura de uma coluna em aço localizada em qualquer posição do compartimento.

Se a coluna estiver no interior da chama, a temperatura é controlada principalmente pela transferência de calor convectiva, enquanto que se a coluna estiver fora da chama, a temperatura é principalmente controlada pela transferência de calor por radiação (Figura 4.2).



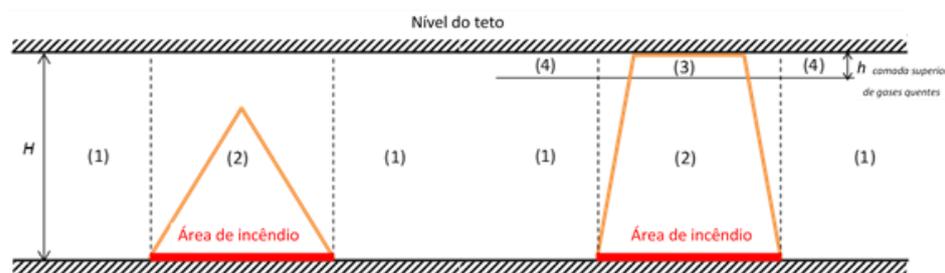
**Figura 4.2** Posição relativa do fogo e da coluna

O modelo assume que a forma do incêndio no pavimento é circular e aplica-se a incêndios localizados que não excedem um diâmetro de 10 m e uma HRR de 50 MW.

O nível de fluxo de calor recebido por uma coluna depende em qual das quatro zonas a coluna está situada:

- 1) Fora do incêndio,
- 2) Dentro do incêndio,
- 3) Dentro do incêndio, na camada superior de gases quentes,
- 4) Fora do incêndio, na camada superior de gases quentes,

Uma ilustração das quatro zonas é apresentada na Figura 4.3.



**Figura 4.3 Zonas para modelar os efeitos de um incêndio localizado**

Antes do projeto LOCAFI, vários modelos foram avaliados para as zonas 2, 3 e 4 mas nenhum modelo foi avaliado para a zona 1.

O novo modelo abrange todas as situações com um destaque especial para a zona 1 e é descrito em detalhe no Anexo A deste documento. A Secção A.2 descreve o modelo para colunas fora da área de incêndio i.e. as zonas 1 e 4. A Secção A.3 descreve o modelo para colunas no interior da área de incêndio, zonas 2 e 3.

A maioria dos incêndios apresentam uma forma cônica. Contudo, o centro do cone pode-se mover devido à ação do vento. Por esta razão, as zonas 2 e 3 são aproximadas a cilindros, com os seus lados alinhados com o contorno do incêndio.

As zonas 3 e 4 apenas existem quando a chama toca o teto. Nesse caso, o valor recomendado para  $h_{camada\ superior\ de\ gases\ quentes}$  é  $H/10$  mas este valor pode ser adaptado como indicado no Anexo AANEXO A.

O método divide-se em dois passos globais; cálculo do fluxo de calor incidente recebido por um segmento da coluna, depois o cálculo da temperatura do segmento.

#### Nota para o leitor

Neste documento, é realizada uma clara distinção entre o fluxo incidente (equivalente ao “*impinging flux*”) e o fluxo absorvido.

A contribuição do fluxo de calor por radiação ( $W/m^2$ ) é dada por:

$$q_{net,rad} = q_{abs,rad} - q_{emi,rad}$$

Onde  $q_{abs,rad}$  é o fluxo de calor por radiação absorvido ( $W/m^2$ ) e  $q_{emi,rad}$  é o fluxo de calor ( $W/m^2$ ) emitido pela superfície. Os fluxos de calor absorvidos e emitidos podem ser reescritos como

$$q_{net,rad} = \alpha_s q_{inc,rad} - \epsilon_s \sigma (\theta_s + 273)^4$$

Onde  $\alpha_s$  é a absorção que segundo Kirchoff é igual à emissividade da superfície  $\epsilon_s$ ,  $q_{inc,rad}$  é a radiação incidente ( $W/m^2$ ),  $\theta_s$  ( $^{\circ}C$ ) é a temperatura da superfície e  $\sigma$  é a constante de Stephan-Boltzmann ( $W/K^4m^2$ ).

Assim, o fluxo de calor por radiação absorvido pela superfície é igual a

$$q_{abs,rad} = \epsilon_s q_{inc,rad}$$

onde o fluxo de calor por radiação incidente pode ser expresso como

$$q_{inc,rad} = \sum_i \sigma \epsilon_{f,i} \phi_i (\theta_{f,i} + 273)^4$$

Onde  $\epsilon_{f,i}$  é a emissividade da fonte  $i$ ,  $\phi_i$  é o fator de vista da fonte  $i$  e  $\theta_{f,i}$  é a temperatura ( $^{\circ}C$ ) da fonte  $i$ .

## 4.2 Ferramentas de cálculo para modelar fluxos de calor de incêndios localizados

O modelo analítico que descreve o comportamento térmico de colunas de aço em situações de incêndio localizado é bastante complexo e não é sustentável para utilização em gabinetes de projeto. Esta secção descreve quatro ferramentas de cálculo que implementaram o ANEXO A deste documento.

### 4.2.1 Nomogramas

#### 4.2.1.1 Introdução

Esta secção descreve um método rápido para calcular os fluxos de calor, baseado em nomogramas. Os nomogramas foram criados através da aplicação do modelo descrito no ANEXO A, e permitem ao utilizador calcular o fluxo de calor incidente para uma localização do seu interesse, sem ser necessário realizar cálculos detalhados. O fluxo absorvido é obtido através da multiplicação do fluxo incidente pela emissividade.

Os nomogramas representam o fluxo de calor a determinada distância do incêndio (caracterizado pelo seu diâmetro e HRR) na direção vertical e horizontal.

Os fluxos de calor para a zona 2 também são representados nos nomogramas, calculados de acordo com o modelo de Heskestad (como descrito na Secção A.3). Neste caso, os nomogramas fornecem o fluxo absorvido.

Nomogramas para vários outros casos podem ser encontrados no Anexo C.

#### 4.2.1.2 Utilização de nomogramas no cálculo

Para utilizar um nomograma, o projetista deve simplificar o cenário de incêndio como indicado seguidamente:

- Passo a) A forma do incêndio é representada como uma área equivalente circular,
- Passo b) A coluna é modelada como um perfil equivalente retangular (Anexo G da NP EN 1991-1-2:2010<sup>[2]</sup>),
- Passo c) A coluna é rodada de forma a que a face mais ampla do retângulo fique perpendicular ao incêndio.

*Passo a)*

Se o principal combustível envolvido num incêndio localizado não for circular, o incêndio deve ser modelado como circular considerando um diâmetro que apresente uma área igual, de acordo com a Equação (4.1):

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

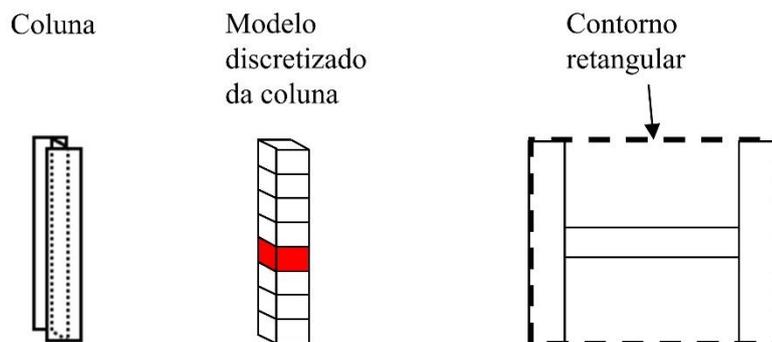
Onde:

$D_{fire}$  diâmetro equivalente (m)  
 $S$  área do incêndio localizado (m<sup>2</sup>)

Para formas complexas, ou formas com uma proporção (comprimento/largura) superior a 2, recomenda-se que a área do fogo seja subdividida em pequenos fogos que se possam aproximar mais facilmente a áreas circulares. Os fluxos provenientes de diferentes fogos podem ser somados, como indicado na Secção A.4.

*Passo b)*

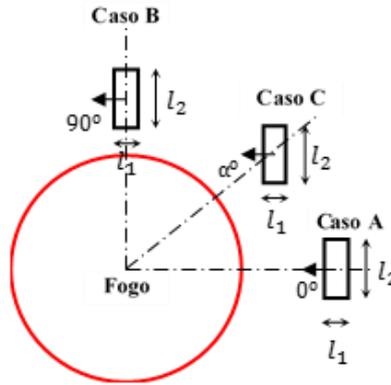
Deve ser desenhado um contorno retangular em volta da secção transversal da coluna, independentemente da sua secção transversal original (Figura 4.4). Esta abordagem está coerente com os pressupostos assumidos no Anexo G da NP EN 1991-1-2:2010. A simplificação da geometria da secção evita a necessidade de se considerar fenómenos complexos como o efeito de sombra (quando parte da secção-transversal “esconde” outras partes da radiação incidente).



**Figura 4.4** Modelação de coluna com secção em H e modelo detalhado de um segmento de uma coluna

*Passo c)*

A orientação é definida por uma linha que une a coluna com o centro da fonte de fogo (Figura 4.5).



**Figura 4.5 Possíveis orientações da coluna**

Na eventualidade de não existir um nomograma que forneça as propriedades exatas para determinado diâmetro equivalente do incêndio, deve ser escolhido o nomograma seguinte referente a um diâmetro e HRR superior, fornecendo um resultado conservativo. O utilizador também pode proceder à interpolação.

Uma vez que os valores dos fluxos são lidos num nomograma, o fluxo de calor incidente médio por radiação recebido pela secção pode ser calculado utilizando-se a Equação (4.2). Os valores são ponderados de acordo com a largura das faces.

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

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

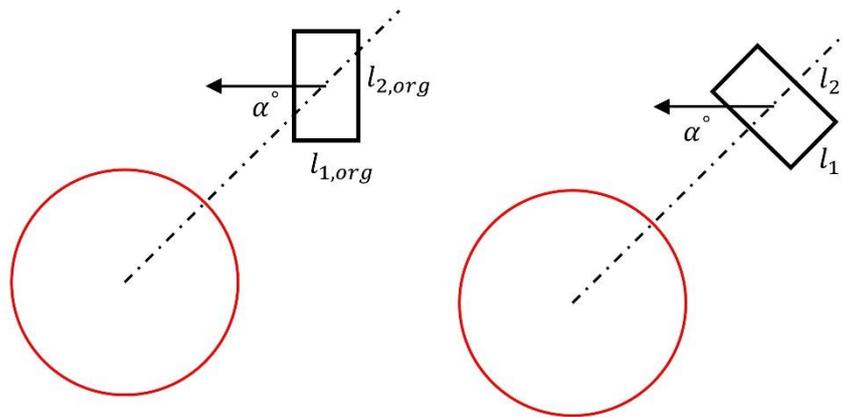
Onde:

$\dot{h}_{m,r}$  é o fluxo de calor por radiação incidente médio na secção

$\dot{h}_{r,1}$  é o fluxo de calor incidente na face 1 da secção, lido para o nomograma apropriado

$\dot{h}_{r,2}$  é o fluxo de calor incidente na face 2 da secção, lido para o nomograma apropriado

Para colunas cujas faces não estejam orientadas perpendicularmente ao incêndio ( $0 < \alpha < 90^\circ$ ), como representado no Caso C da Figura 4.5, é necessário ajustar as larguras das faces antes de se consultar os nomogramas, como representado na Figura 4.6. Após a rotação, a Eq. 4.2a pode ser utilizada como os novos valores de  $l_1$  e  $l_2$ .



**Figura 4.6 Ajuste das colunas cujas faces não estão orientadas perpendicularmente ao incêndio**

As larguras originais são  $l_{1,org}$  e  $l_{2,org}$ . As larguras ajustadas são obtidas por

$$l_2 = l_{1,org} \times \sin \alpha + l_{2,org} \times \cos \alpha \quad (4.4)$$

$$l_1 = (l_{1,org} + l_{2,org}) - l_2 \quad (4.5)$$

Posteriormente o fluxo é calculado de acordo com a Equação (4.2a) com os novos valores de  $l_1$  e  $l_2$ .

Os nomogramas consideram que a chama não atinge o teto. No caso da chama atingir o teto (por aplicação da Equação (A.2)), o projetista deve considerar adicionalmente a ‘camada superior de gases quentes’ (zona 4 da Figura 4.3). O fluxo de calor nessa zona deve ser calculado através da Equação (A.21). Na maioria das situações, o fluxo de calor na zona 4 será superior ao da zona 1 (indicado nos nomogramas). Assim, o maior valor de temperatura na coluna, que deve ser o valor a utilizar para os cálculos da resistência da Secção 5, será na zona 4.

#### 4.2.2 Folhas de cálculo

Pode-se obter um elevado grau de precisão realizando os cálculos através de folhas de cálculo, utilizando o modelo apresentado no Anexo A e B deste documento. Uma folha de cálculo pode ter em conta o atual fator de vista entre o incêndio e as faces da secção. Exemplos de cálculo através de folhas de cálculo são apresentados na Figura B.9 e Figura B.11.

Como a transferência térmica é um processo complexo, as equações são numerosas e compridas. Recomenda-se que os cálculos sejam implementados por especialistas.

#### 4.2.3 OZone

Como alternativa ao cálculo manual ou ao desenvolvimento da própria ferramenta de cálculo, vários programas de cálculo têm sido desenvolvidos implementando o modelo térmico do LOCAFI. Uma ferramenta facilmente disponível com esse objetivo é o OZone.

O OZone é um programa de fácil utilização que calcula a ação térmica produzida por um incêndio e a evolução da temperatura num elemento estrutural de aço. O OZone inclui as curvas de incêndio nominais e dois tipos de modelos de incêndios naturais: incêndios localizados e incêndios em compartimentos. O OZone

(juntamente com outros programas relacionados com incêndios desenvolvidos pela ArcelorMittal) pode ser encontrado em:

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

Para incêndios em compartimentos, o OZone permite a utilização de modelos de incêndio de uma zona ou modelos de duas zonas como definido no Anexo D da NP EN 1991-1-2:2010. O principal pressuposto dos modelos de zona é que os compartimentos estão divididos em zonas em que a distribuição da temperatura é uniforme em qualquer momento. Nos modelos de uma zona, a temperatura é considerada uniforme no interior do compartimento. Assim, este tipo de modelo é válido para incêndios totalmente desenvolvidos num compartimento. Os modelos de duas zonas são mais apropriados para incêndios que permaneçam confinados. Nesse caso, os modelos de duas zonas representam melhor a distribuição da temperatura no compartimento, com uma camada superior de gases quentes perto do teto e uma camada inferior abaixo.

Em espaços abertos ou grandes compartimentos, onde não ocorre *flashover*, o comportamento da estrutura deve ser analisado para condições de incêndio localizado. O procedimento para incêndios localizados implementado no OZone é baseado no modelo do LOCAFI.

Como discutido na Secção A.2.1.1, a maior parte das trocas de calor por radiação são modeladas através da representação do fogo como uma chama sólida virtual que irradia em todas as direções. O primeiro passo deste cálculo define a geometria da chama sólida virtual representando o incêndio localizado e a distribuição de temperatura como uma função do tempo. A forma da chama sólida virtual pode ser cilíndrica ou cónica. A chama sólida virtual cilíndrica é um modelo mais simples, mas normalmente sobredimensiona os fluxos de calor por radiação. No OZone foi implementada a chama com forma cónica que demonstrou prever mais corretamente os fluxos de calor.

Nos casos em que o comprimento da chama é mais alto que o nível do teto, a altura do cilindro ou do cone deve ser considerada como a altura do teto. Um anel adicional, que representa o alastrar da chama abaixo do teto, deve ser considerado fora do cilindro ou do cone.

O cálculo da radiação foi implementado no OZone sem a utilização dos integrais de superfície (como utilizado no SAFIR, ver Secção 4.2.4). Em vez disso, o modelo é baseado nos fatores de configuração apropriados para a forma do elemento, como representado na Equação (A.9).

O fluxo é calculado separadamente para as 4 faces do perímetro de contorno do perfil e um valor médio desse fluxo é aplicado a todo o perímetro de contorno da secção de aço. Isto significa que o efeito de sombra não é tido em conta. A associação de incêndio localizado com incêndio generalizado no compartimento permite a combinação das influências dos fluxos de calor por radiação.

Os dados de entrada requeridos para um incêndio localizado incluem a posição, diâmetro e a evolução da HRR com o tempo para um máximo de 5 incêndios.

Para modelos de incêndio natural, podem ser utilizados vários cenários. Para incêndios em compartimentos, é necessário definir as características do compartimento e do incêndio, utilizando o Anexo E da NP EN1991-1-2:2010 ou utilizando um incêndio definido pelo utilizador.

Se não for definido o compartimento, é assumido que o incêndio localizado desenvolve-se num espaço aberto. Se o compartimento e o incêndio localizado forem definidos, o OZone calcula as temperaturas da camada superior de gases quentes e inferior no compartimento considerando automaticamente a área máxima de incêndio como a soma das áreas dos incêndios localizados. Para o cálculo da temperatura, o OZone propõe três opções: temperatura da camada superior de gases quentes, temperatura do incêndio localizado, ou o máximo dos dois valores (indicado no programa como ‘Máximo Entre os Dois’).

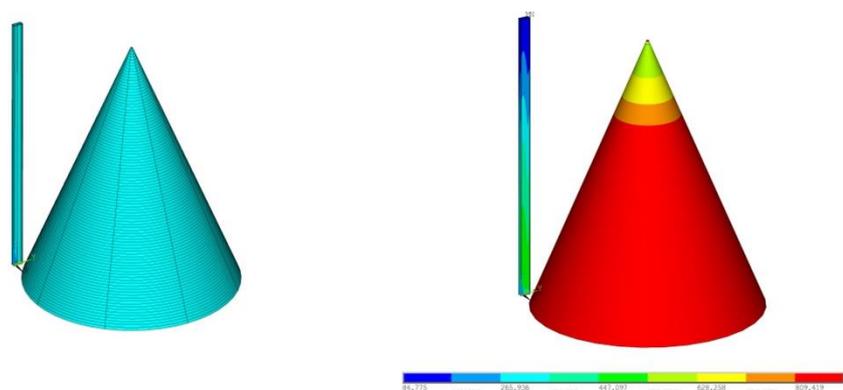
#### 4.2.4 Modelos de elementos finitos

Se o projetista desejar um grande nível de precisão, programas de elementos finitos (EF) como o SAFIR® ou o ANSYS® podem ser aplicados. A utilização de um modelo de EF reduz o número de simplificações que é necessário fazer e apresenta as seguintes vantagens:

- Pode ser garantida uma aproximação mais precisa para a forma cônica da chama sólida virtual, em vez de uma sucessão de cilindros e anéis.
- Pode ser considerada a forma real da coluna, incluindo o efeito de sombra na transferência de radiação.
- Os fatores de vista entre cada face e a chama sólida virtual podem ser calculados independentemente.
- Pode ser calculada uma temperatura não uniforme na secção transversal do perfil.
- Pode ser considerada a combinação do comportamento térmico e mecânico. Um exemplo disto é a curvatura induzida pela variação diferencial de temperaturas de uma coluna aquecida assimetricamente.

Os diferentes programas podem implementar modelos de diferentes formas, como o nível de discretização, uma breve descrição da abordagem implementada no SAFIR é apresentada seguidamente, com o intuito de detalhar as diferentes considerações numéricas para a implementação

No SAFIR estão implementadas duas formas de chama; cilíndrica e cônica. O utilizador é livre de escolher cada uma delas, dependendo da sua preferência. Na Figura 4.7 representa-se um exemplo da chama cônica



**Figura 4.7** Forma da chama (esquerda) e temperatura da superfície (direita) no SAFIR

O modelo térmico do SAFIR calcula a temperatura através de uma série de análises térmicas 2D realizadas para cada ponto longitudinal de integração de cada elemento finito estrutural definido pelo utilizador. Estes elementos podem ter qualquer orientação no espaço.

O fluxo de calor em qualquer momento é calculado separadamente para cada face do elemento finito. Isto significa que o fluxo de calor incidente proveniente do incêndio localizado que incide no elemento finito é anisotrópico; as faces que estão orientadas na direção do fogo recebem o maior fluxo, enquanto que as faces no lado oposto não recebem nenhum fluxo.

Quando o fluxo proveniente de um incêndio localizado é calculado numa face, as perdas de calor são automaticamente adicionadas da face para a área envolvente, que se assume estar à temperatura ambiente.

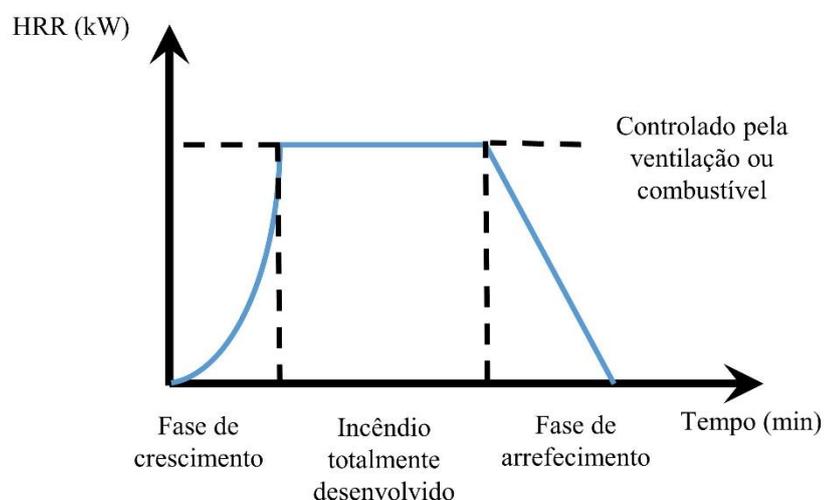
A fonte de incêndio é dividida em fatias horizontais com igual profundidade de 0.1 m. Este valor é menor que o valor de 0.5 m recomendado para o cálculo manual (ver Secção A.2.1.1). Cada fatia e cada anel são divididos em 36 partes de 10 graus cada. Estas divisões definem uma série de facetas que formam a face externa da chama. O fluxo de radiação proveniente de cada faceta é calculado para cada face da secção.

A estrutura pode estar sujeita a um ou vários incêndios localizados. No caso de existirem múltiplos incêndios, os fluxos provenientes de cada incêndio são adicionados.

### 4.3 Determinação da temperatura de um segmento da coluna de aço

Esta secção descreve o processo de cálculo da temperatura de um segmento de uma coluna, baseado no fluxo incidente. Como indicado na Secção 5, o cálculo dos elementos requer temperaturas em vez de fluxos.

A taxa de libertação de calor (HRR) pode ser determinada através do Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010, que divide a curva HRR (ver Figura 4.8) em 3 partes: uma fase de crescimento, uma fase constante (se existir) onde o incêndio é controlado pelo combustível ou pela ventilação, e uma fase de arrefecimento. Com esta forma de curva, a fase mais crítica em termos de ações térmicas é a fase constante.



**Figura 4.8** Curva HRR calculada de acordo com o Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010

O calor libertado por um incêndio é dependente do tempo, o que indica que o fluxo deve ser calculado para vários passos de tempo. Tendo também em consideração o facto de que o fluxo de calor varia com o comprimento da coluna, o número de cálculos aumenta consideravelmente.

À medida que um segmento começa a receber fluxo proveniente de um incêndio, a sua temperatura aumenta. Na fase controlada pelo combustível, o fluxo mantém-se constante, havendo um ponto em que o fluxo absorvido pelo segmento é equilibrado pelo fluxo irradiado para o ambiente envolvente, que é conhecida como a temperatura estacionária.

Se o segmento tiver um grande volume, o tempo necessário para atingir a temperatura estacionária pode ser longo. Em muitos casos o tempo necessário para atingir a temperatura estacionária é maior que a duração do incêndio, não sendo nunca alcançada a temperatura estacionária.

Conservativamente o projetista pode assumir que a fase estacionária é sempre atingida. Isto reduz significativamente o esforço computacional requerido, uma vez que a dependência do tempo no cálculo é anulada. Contudo, a temperatura da fase estacionária que se assume ser atingida pode ser consideravelmente superior à temperatura que realmente é atingida. Os projetistas preparados para realizar análises mais avançadas, tendo em conta a dependência com o tempo, podem obter cálculos mais eficientes ao nível de custo-benefício. O método avançado é referido abaixo como o 'método incremental', na Secção 4.3.2.

O método recomendado para avaliação da temperatura depende da precisão com que o fluxo é calculado. Para cada um dos quatro métodos apresentados na Secção 4.2 recomenda-se o seguinte:

- Para cálculos através de nomogramas, o fluxo de calor total é dado para a fase estacionária. A temperatura é calculada de acordo com as equações apresentadas na Secção 4.3.1.
- Para cálculos através de folhas de cálculo, é recomendável calcular o fluxo de calor total absorvido por um segmento de coluna para os seguintes valores de HRR: 25%, 50%, 75% e 100% do máximo. A temperatura deve ser calculada utilizando o método incremental (Secção 4.3.2).
- O OZone realiza o cálculo de acordo com o método incremental. Não é necessário introduzir parâmetros de entrada adicionais.
- Os programas de EF permitem calcular na mesma análise fluxos de calor e temperaturas.

Como os diferentes segmentos localizados a diferentes níveis ao longo da altura da coluna recebem diferentes fluxos, resultarão temperaturas diferentes ao longo da coluna. Essas diferenças levarão a fluxos de calor por condução ao longo da coluna que tenderão a igualar a temperatura do aço nos segmentos adjacentes. Para ter em conta este efeito seria necessário um modelo 3D da coluna. Várias análises numéricas têm demonstrado que este efeito é bastante limitado, e a distribuição de temperatura real é suficientemente bem aproximada por uma série de análises térmicas 2D realizadas a diferentes níveis, cada uma com as condições fronteira que prevalecem a cada nível.

#### **4.3.1 Método da fase estacionária**

Conhecendo o fluxo de calor médio absorvido por um segmento, a sua temperatura pode facilmente ser calculada através das equações presentes nos Eurocódigos.

Estando o segmento fora do incêndio, as trocas convectivas serão com o ar ambiente (20°C), exceto se for combinado com um incêndio generalizado no compartimento. Para as trocas de radiação, a secção irá absorver  $\epsilon \dot{h}_{m,r}$  e irradiar para o ambiente envolvente.

Portanto a equação de balanço de calor será:

$$0 = \alpha_c(\theta - 20) + \sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4] - \varepsilon\dot{h}_{m,r} \quad (4.6)$$

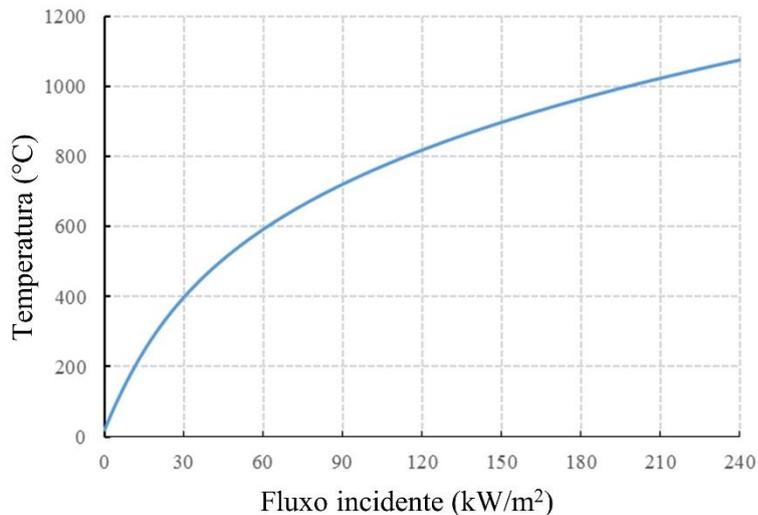
Onde:

- $\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção = 35 W/(m<sup>2</sup>K) de acordo com a NP EN 1991-1-2:2010
- $\sigma$  é a constante de Stephan-Boltzmann, igual a 5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)
- $\varepsilon$  é a emissividade do aço (a NP EN 1993-1-2:2010 indica o valor de 0.7)
- $\theta$  é a temperatura do aço, em °C

A temperatura da fase estacionária não depende da massividade e propriedades do material da secção.

Esta equação pode ser resolvida iterativamente, levando a uma relação entre  $\theta$  e  $\dot{h}_{m,r}$ . Considerando os valores recomendados para  $\sigma$  e  $\varepsilon$ , a Equação (4.6) toma a forma apresentada na Figura 4.9.

No caso do elemento estar envolvido pelo incêndio (Heskestad) ou na camada superior de gases quentes (Hasemi) o termo  $\varepsilon\dot{h}_{m,r}$  deve ser substituído pelo fluxo absorvido.



**Figura 4.9** Relação entre a temperatura estacionária e o fluxo de calor incidente

### 4.3.2 Método incremental

Uma vez calculado o fluxo de calor incidente, o método incremental descrito na NP EN 1993-1-2:2010 pode ser aplicado para determinar a relação tempo-temperatura. A temperatura da secção depende do fluxo de calor efetivo, que é a diferença entre o fluxo de calor incidente e o fluxo de calor emitido. O fluxo de calor efetivo é obtido através da equação de balanço térmico, de que a Equação (4.7) é um caso especial:

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

Onde:

- $\rho_a$  é a densidade do aço, em kg/m<sup>3</sup>  
 $c_a$  é o calor específico do aço, em J/(kgK)  
 $A_m/V$  é o fator de massividade do segmento, em m<sup>-1</sup>

A partir desta equação, a temperatura é calculada de maneira incremental utilizando um passo de tempo  $\Delta t$  (por exemplo 5 s) com:

$$T^{t+\Delta t} = \theta^t + \Delta t \frac{A_m}{V} \frac{1}{\rho C_p(T^t)} [\varepsilon \dot{h}_{m,r} - \alpha_c(\theta - 20) - \sigma\varepsilon((\theta + 273)^4 - 293^4)] \quad (4.8)$$

Onde:

$T^{t+\Delta t}$  é a temperatura no tempo  $t+\Delta t$ .

No caso do elemento estar envolvido pelo incêndio (Heskestad) ou na camada superior de gases quentes (Hasemi) o termo  $\varepsilon \dot{h}_{m,r}$  deve ser substituído pelo fluxo absorvido.

Todas as quantidades do lado direito da equação dependentes do tempo devem ser avaliadas no tempo  $t$  em que a HRR varia no tempo. Esta equação pode facilmente ser implementada numa folha de cálculo *excel*. Os cálculos da temperatura no OZone baseiam-se neste método.

## 5 DIMENSIONAMENTO DA COLUNA

A NP EN 1993-1-2:2010 e a NP EN 1994-1-2:2011 fornecem modelos para determinar a resistência mecânica de um elemento estrutural e o critério de integridade que é necessário cumprir quando exposto a um incêndio nominal ou natural. Elas definem os valores de cálculo das propriedades mecânicas e térmicas do material em relação aos valores característicos. Os valores de cálculo são obtidos pelos valores característicos divididos pelo fator parcial  $\gamma_{M,fi}$ . Contudo, como o valor recomendado para  $\gamma_{M,fi} = 1.0$  é aceite por todos os Anexos Nacionais, as propriedades térmicas são geralmente referidas sem nenhuma designação como valor característico ou de cálculo.

### 5.1 Verificação

A verificação é expressa como o requisito, no tempo  $t$  durante a exposição ao fogo, em que:

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

Os efeitos de ações indiretas (esforços internos na estrutura devido a deformações e restrições à expansão térmica) não necessitam de ser considerados quando a segurança ao fogo é baseada na curva temperatura-tempo padrão. Nos outros casos, as ações indiretas não necessitam de ser consideradas quando o efeito é identificado como sendo insignificante ou quando as condições fronteira do modelo de cálculo são conservativas.

### 5.2 Carga

Como simplificação, o valor de  $E_{fi,d}$  para a análise dos elementos pode ser obtido como:

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

Onde:

$E_d$  é o valor de cálculo do efeito das ações da combinação fundamental (estados limites últimos) como indicado na NP EN 1990:2009

$\eta_{fi}$  é o fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento

O valor do fator de redução  $\eta_{fi}$  dependerá se as Equações 6.10 ou 6.10a e 6.10b, da NP EN 1990:2009, são utilizadas para a combinação fundamental.

Se a Equação 6.10 da NP EN 1990:2009 for utilizada para a combinação fundamental o fator de redução  $\eta_{fi}$  é dado por:

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

Se as Equações 6.10a e 6.10b forem utilizadas para a combinação fundamental o fator de redução  $\eta_{fi}$  é dado pelo menor valor das duas expressões seguintes:

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

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

Onde:

- $G_k$  é o valor característico da ação permanente
- $Q_{k,1}$  é o valor característico da ação variável base
- $\xi$  é o fator de redução para as ações permanentes desfavoráveis, como indicado na NP EN 1990:2009
- $\Psi_{0,1}$  é o coeficiente de combinação para o valor da ação variável
- $\Psi_{1,1}/\Psi_{2,1}$  é o fator de frequência para o valor da ação avariável

Note-se que os fatores de redução, frequência e combinação são Parâmetros Determinados a nível Nacional, e por isso variam de país para país. Os projetistas devem garantir que estão a utilizar os valores corretos.

## 5.3 Resistência

Para um elemento com uma distribuição de temperatura não uniforme, a resistência pode ser obtida como para uma distribuição uniforme de temperatura considerando a temperatura como igual ao valor máximo da temperatura do elemento no tempo considerado.

A temperatura  $\theta$  do elemento é determinada de acordo com os métodos descritos na Secção 4. A temperatura da coluna deve ser determinada para várias alturas, sendo a temperatura mais elevada utilizada para determinar a resistência da coluna.

Modelações numéricas têm mostrado que a temperatura máxima tende a ocorrer a uma altura de cerca de 1/3 da altura da coluna, assumindo que a chama não atinge o teto. Quando a chama atinge o teto, a temperatura máxima é provável que ocorra na camada superior de gases quentes (zona 4 da Figura 4.3).

### 5.3.1 Classificação da secção

Como para o cálculo à temperatura normal, todas as secções transversais que estejam totalmente ou parcialmente comprimidas são classificadas de forma a estabelecer-se a resistência de cálculo da secção transversal apropriada.

À medida que a tensão de cedência e o módulo de elasticidade do aço diminuem em diferentes proporções em situação de incêndio, as classificações das secções a elevadas temperaturas podem ser diferentes da classificação à temperatura normal.

No entanto, em vez de se determinar a classificação a cada elevação de temperatura, uma única classificação é realizada, baseada no comportamento à temperatura normal. A classificação é realizada de acordo com as regras da NP EN 1993-1-1:2010 exceto para o valor de  $\varepsilon$  que para situação de incêndio é dado pela cláusula 4.2.2 da NP EN 1993-1-2:2010 como:

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

onde  $f_y$  é a tensão de cedência a 20°C.

O coeficiente 0.85 tem em conta a variação das propriedades do material a elevadas temperatura e é uma aproximação para  $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{y,\theta}}$ . É possível uma coluna ter uma classe mais gravosa em situação de incêndio que à temperatura normal por exemplo Classe 3 à temperatura normal e Classe 4 em situação de incêndio.

As regras para o cálculo da resistência de uma secção transversal de Classe 4 em situação de incêndio são indicadas na NP EN 1993-1-2:2010<sup>[3]</sup>. Análise adicional sobre este tema está fora do âmbito deste manual.

### 5.3.2 Resistência à encurvadura por flexão

O cálculo da resistência à encurvadura de colunas de Classe 1, 2 ou 3 com uma temperatura uniforme  $\theta_a$  no tempo  $t$  é realizado de forma similar ao cálculo para temperatura normal mas com ajustes para redução das propriedades a elevadas temperaturas. O valor de cálculo da resistência é dado pela cláusula 4.2.3.2. da NP EN 1993-1-2:2010 como:

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

O fator de redução para a encurvadura por flexão  $\chi_{fi}$  é igual ao menor dos valores em torno dos eixos y-y e z-z, determinado de acordo com:

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

Onde:

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

Com:

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

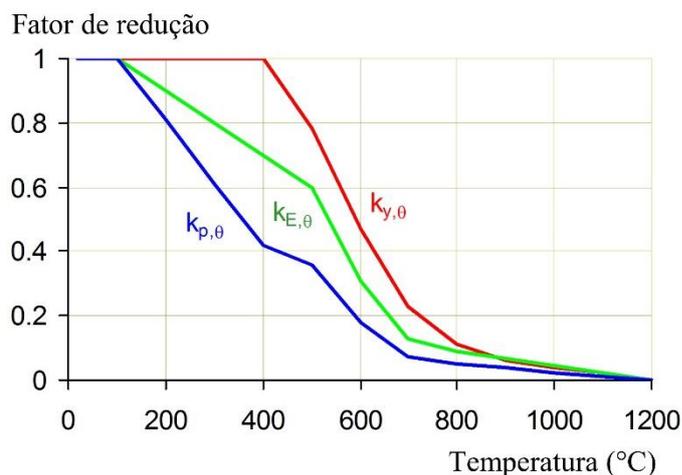
A esbelteza normalizada para a temperatura uniforme  $\theta_a$  é obtida por:

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

Onde:

- $A$  é a área da secção transversal da coluna de aço
- $k_{y,\theta}$  é o fator de redução para a tensão de cedência do aço dependente da temperatura
- $k_{E,\theta}$  é o fator de redução para o modulo elástico do aço dependente da temperatura
- $f_y$  é a tensão de cedência do aço
- $\bar{\lambda}$  é a esbelteza normalizada à temperatura normal

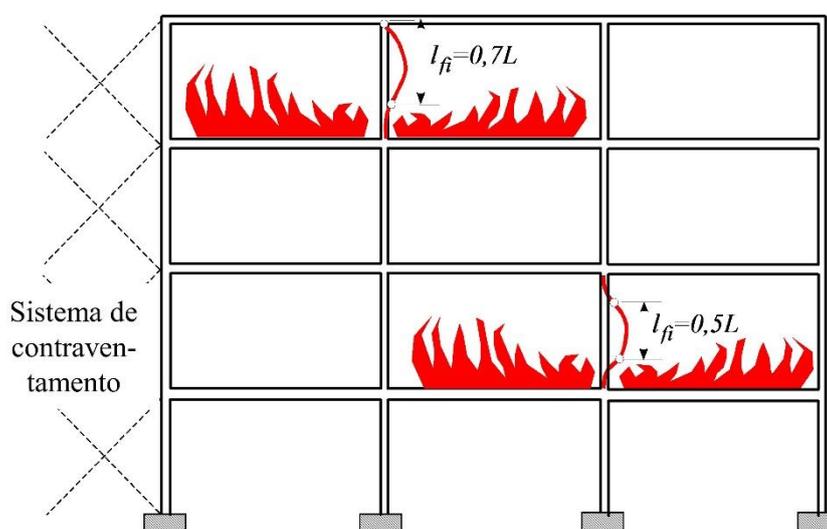
Os fatores de redução  $k_{y,\theta}$  e  $k_{E,\theta}$  são dependentes da temperatura. Na NP EN 1993-1-2:2010<sup>[3]</sup> são indicados esses valores e apresentados na Figura 5.1.



**Figura 5.1** Fatores de redução para a relação de tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas

### 5.3.3 Comprimentos de encurvadura

A cláusula 4.2.3.2(3) da EN 1993-1-2 recomenda que a esbelteza normalizada  $\bar{\lambda}$  seja determinada como à temperatura normal exceto, para pórticos contraventados, o comprimento de encurvadura de uma coluna  $l_{fi}$  poderá ser determinado considerando as suas restrições nos topos, como representado na Figura 5.2, desde que cada piso do edifício compreenda um compartimento de incêndio separado, e que a resistência ao fogo dos limites do compartimento de incêndio não seja inferior à resistência ao fogo da coluna. Uma vez que as colunas contínuas são muito mais rígidas que as colunas do compartimento de incêndio, assume-se que elas restringem a(s) extremidade(s) da coluna aquecida.



**Figura 5.2** Comprimentos de encurvadura de colunas expostas ao fogo.

## **5.4 Cálculo da resistência ao fogo através de análise por elementos finitos**

Como alternativa ao modelo mecânico descrito na Secção 5.3, a resistência da secção também pode ser determinada através de uma análise por EF.

O programa de EF escolhido pelo projetista deve ser capaz de realizar uma análise ‘combinada’, onde as componentes térmicas e mecânicas da análise sejam calculadas simultaneamente.

A análise térmica deve ser realizada utilizando-se uma ferramenta capaz de calcular o fluxo de calor incidente proveniente de uma ‘chama sólida’. A forma da chama é definida de acordo com as equações apresentadas na Secção A.2. Não são necessárias capacidades CFD. Este assunto é tratado de forma mais detalhada seguidamente na Secção A.2.1.1.

Para a parte relativa à análise mecânica, é recomendável que se aplique um modelo material não linear. Dependendo da preferência do utilizador, podem ser utilizados elementos de barra ou membrana. Nos dois casos, deve-se garantir que os efeitos de imperfeições iniciais são tidos em consideração. No Anexo C<sup>[18]</sup> da NP EN 1993-1-5:2012 pode encontrar-se orientações adicionais para a modelação de EF.



## 6 REFERÊNCIAS

- 1 NP EN 1990 (2009): Eurocode 0: Basis of structural design
- 2 NP EN 1991-1-2 (2010): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- 3 NP EN 1993-1-2 (2010): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- 4 NP EN 1994-1-2 (2011): 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, 2<sup>nd</sup> 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 NP EN 1993-1-5(2012): 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. (Available from: <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 CÁLCULO DA CARGA DE INCÊNDIO EM COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS**

Consideráveis evidências experimentais, conforme descrito na Seção 3.2, permitiram calibrar e verificar um modelo analítico para determinar o fluxo de calor incidente e o aumento da temperatura de uma coluna sujeita a um incêndio localizado. O modelo é descrito neste Anexo.

Os processos físicos de transferência de calor por radiação e convecção mostram que o modelo é bastante complexo, e não se prevê que os projetistas tentem aplicar o modelo através de cálculos manuais, embora seja possível a sua utilização através de folhas de cálculo. Em vez disso, foram desenvolvidas várias abordagens simplificadas que têm em conta os princípios do modelo, como discutido na Seção 4.

## **A.1 Generalidades**

A temperatura de uma coluna sujeita a um incêndio localizado pode ser obtida através do método descrito abaixo. O método determina a temperatura de um segmento de uma coluna a uma altura específica e pode ser aplicado várias vezes, a qualquer altura, com o objetivo de construir um perfil de temperatura.

O método divide-se em dois passos globais; cálculo do fluxo de calor incidente recebido pelo segmento, depois cálculo da temperatura do segmento.

Assume-se que a forma do incêndio no pavimento é circular e aplica-se a incêndios localizados que não excedam um diâmetro de 10 m e uma HRR de 50 MW.

Se a forma do principal combustível envolvido no incêndio localizado não for circular, o incêndio é modelado como um círculo com um diâmetro que tenha uma área igual, de acordo com a Equação (A.1):

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

Onde:

$D_{fire}$       diâmetro equivalente (m)  
 $S$             área do incêndio localizado (m<sup>2</sup>)

Os domínios de aplicação são apresentados na Figura 4.3. A Seção A.2 descreve o modelo para colunas fora da área de incêndio (zonas 1 e 4) e a Seção A.3 descreve o modelo para colunas no interior da área de incêndio (zonas 2 e 3).

## **A.2 Coluna fora da área de incêndio**

As chamas produzidas por um incêndio localizado afetam uma coluna exposta principalmente através do fluxo de calor por radiação se a coluna não estiver envolvida nas chamas. A forma da chama e a posição relativa da chama em relação à coluna têm uma forte influência sobre o fluxo de calor por radiação recebido pela coluna.

Para grande parte do volume do compartimento, o fluxo de calor convectivo fora da área de incêndio pode ser assumido como desprezável. No entanto, esta consideração não é verdadeira na camada superior de gases quentes que se espalha debaixo do teto quando a chama atinge o teto. Num incêndio localizado, geralmente a altura desta camada é pequena comparada com a altura do compartimento.

Se existirem algumas obstruções que possam impedir a propagação do fumo debaixo do teto, então a altura da camada superior de gases quentes  $h_{camada\ superior\ de\ gases\ quentes}$  deve ser definida pela característica geométrica da obstrução (geralmente a altura das vigas). Na prática, recomenda-se um valor de 10 % da altura do teto.

São aplicadas diferentes expressões para obter o fluxo de calor incidente dependendo se a localização de interesse está fora ou dentro da camada superior de gases quentes (ver Secção A.2.1 e A.2.2).

### A.2.1 Coluna fora da camada superior de gases quentes

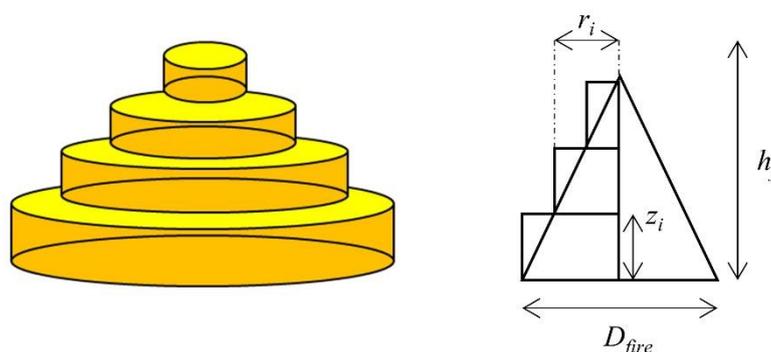
O procedimento divide-se em 3 passos:

- Modelar a geometria da superfície da chama,
- Calcular a temperatura da chama,
- Estimar o fluxo de calor por radiação incidente num segmento da coluna de aço.

O fluxo de calor convectivo é ignorado e o fluxo de calor por radiação é modelado utilizando o conceito de uma chama sólida, i.e. a chama é vista como uma superfície sólida que irradia calor para a coluna.

#### A.2.1.1 Geometria da superfície da chama sólida

O primeiro passo é construir a superfície da chama. É assumida uma forma cônica, formada por uma série de cilindros (faces verticais) e anéis (faces horizontais) de diâmetro decrescente (Figura A.1).



**Figura A.1 Modelo da chama sólida (esquerda) e detalhes geométricos (direita)**

A altura da chama  $h_f$  é calculada utilizando a correlação do Anexo C da NP EN 1991-1-2:2010<sup>[2]</sup>:

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

Onde:

$D_{fire}$  é o diâmetro do incêndio (m)

$Q(t)$  é a HRR do incêndio (W)

O raio  $r_i$  para um cilindro à altura  $z_i$  é igual a:

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

Para facilitar a utilização, o número de cilindros para modelar o fogo deve ser limitado. Um cilindro de 0.5 m de profundidade fornece um bom balanço entre precisão e aplicabilidade, sendo portanto recomendado esse valor. Muito do lado da segurança e por simplificação pode-se considerar a altura do cilindro igual à altura da chama  $h_f$ . Neste caso a chama sólida reduz-se a duas componentes: um cilindro com um disco no topo (diâmetro =  $D_{fire}$ ).

### A.2.1.2 Propriedades da radiação e temperatura da chama

O segundo passo é o cálculo das propriedades da radiação da chama e assim a temperatura da chama sólida. A temperatura de um cilindro específico e anel à distância  $z_i$  ao longo do eixo da chama (Figura A.2) é considerada constante e igual a:

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

Onde  $z_{virt}$  é a origem virtual, obtida por:

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

Estas fórmulas são as Equações C.2 e C.3 da NP EN 1991-1-2:2010. O comprimento  $h_f$  é definido como o ponto onde a temperatura dos gases ao longo do eixo da chama atinge 520°C, de acordo com a Equação (A.4).

É importante notar que a HRR varia com o tempo, significando que as características da chama e os fluxos de calor variam durante o incêndio.

É possível ter em conta casos em que a fonte de incêndio não está no pavimento mas a uma altura diferente  $z_{fire}$  ajustando-se a altura abaixo do teto ( $h_{ceil}$  é substituída por  $h_{ceil} - z_{fire}$ ).

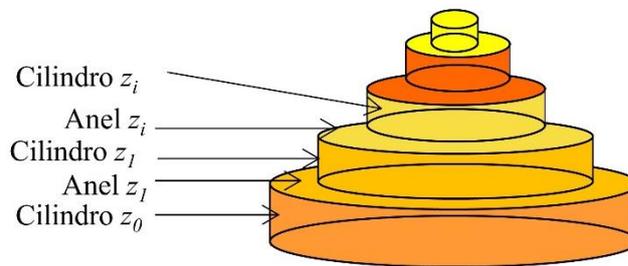


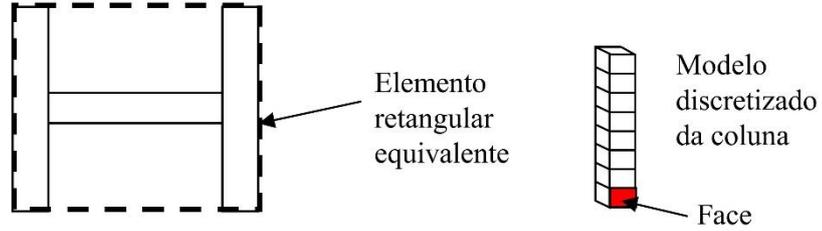
Figura A.2 Modelo simplificado de um fogo utilizando anéis e cilindros

### A.2.1.3 Fluxo de calor por radiação recebido por um segmento de coluna

Primeiramente, a secção transversal da coluna é modelada como secção transversal retangular, independentemente da sua secção transversal original (Figura A.3). Esta abordagem é coerente com a suposição feita no Anexo G da NP EN 1991-1-2:2010. A eliminação da complexa geometria da secção evita a

necessidade de se ter em conta fenômenos complexos tais como o efeito de sombra (onde parte da secção transversal “esconde” outras partes da radiação incidente).

A coluna é dividida em segmentos (de altura  $z_j$ ) e o fluxo de calor é calculado para cada uma das quatro faces do segmento, sendo depois calculado o valor médio.



**Figura A.3 Modelação de coluna com secção em H e modelo detalhado de um segmento de uma coluna**

Como é assumido que a emissividade e a temperatura são constantes em toda a superfície de cada segmento, o fluxo de calor por radiação pode ser calculado utilizando um fator de vista, que mede a fração de calor por radiação total que emana de uma dada superfície radiante e que chega a uma dada superfície recetora. O seu valor depende do tamanho da superfície radiante, da distância entre a superfície radiante e a superfície recetora e da sua orientação relativa. Existem fórmulas analíticas para o cálculo dos fatores de vista para vários cenários, incluindo as fórmulas usadas aqui para a chama sólida.

O fator de vista  $\emptyset$  entre um plano infinitesimal e um cilindro finito é obtido pela Equação (A.6). Os parâmetros geométricos são representados na Figura A.4.

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

Onde

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

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

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

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

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

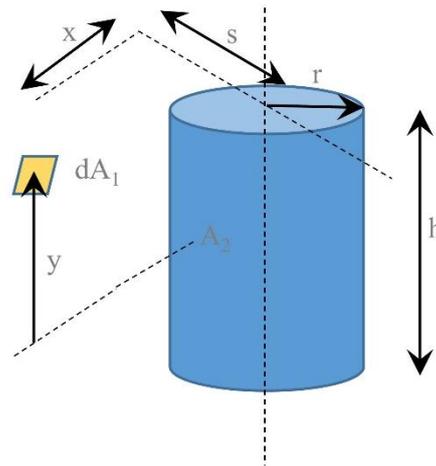
Onde:

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

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

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

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



**Figura A.4** Termos geométricos utilizados para calcular o fator de vista entre um plano infinitesimal e um cilindro finito

O fluxo de calor por radiação absorvido pela *face<sub>j</sub>* proveniente do cilindro *z<sub>i</sub>* é então:

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

Onde:

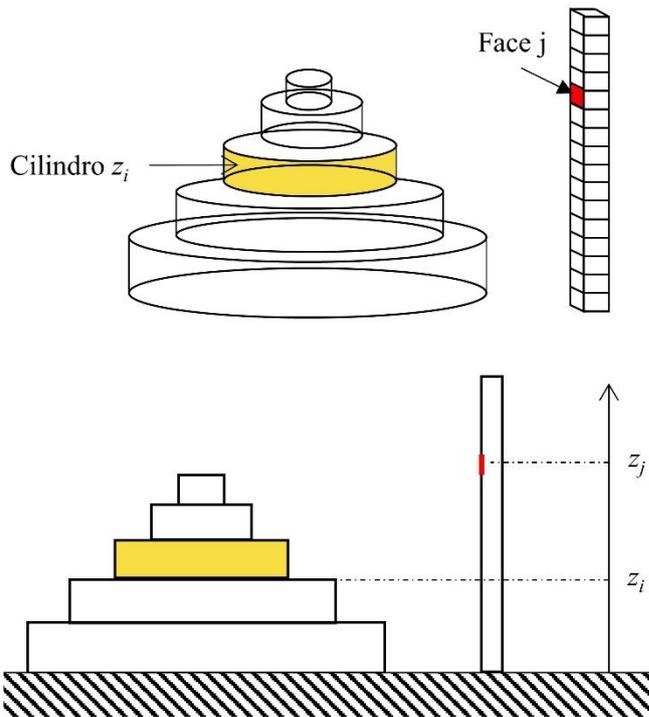
$\varepsilon$  é a emissividade do aço (NP EN 1993-1-2:2010 indica o valor de 0.7)

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

$\theta_f(z_i)$  é a temperatura do cilindro *z<sub>i</sub>*, obtida através da Equação (A.4)

$\Phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j}$  é o fator de vista do *z<sub>i</sub>* e da *face<sub>j</sub>* obtido através da Equação (A.6)

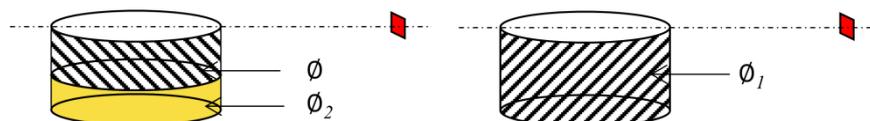
Um modelo do fogo é apresentado na Figura A.5.



**Figura A.5** Vista 3d da troca de radiação entre o cilindro  $z_i$  e a face  $j$  (acima), vista lateral (abaixo)

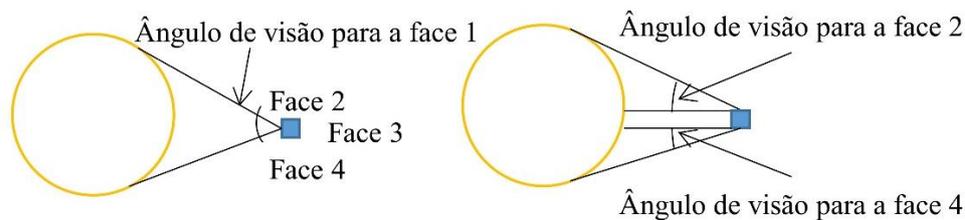
Os fatores de vista são somados<sup>[2]</sup>. Por exemplo, o fator de vista  $\emptyset$  para o caso apresentado na Figura A.6 pode ser calculado através dos fatores de vista  $\emptyset_1$  e  $\emptyset_2$ :

$$\emptyset_1 = \emptyset + \emptyset_2 \Rightarrow \emptyset = \emptyset_1 - \emptyset_2 \quad (\text{A.8})$$



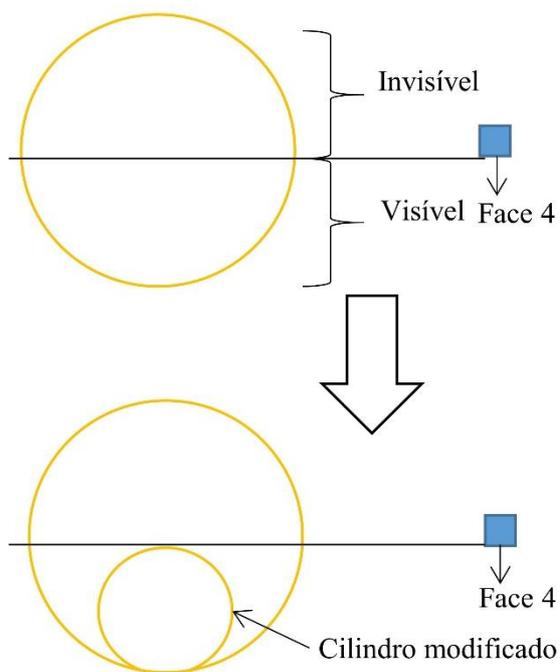
**Figura A.6** Regra de adição para os fatores de vista

É necessário aplicar regras adicionais para determinar o fator de vista e assim o fluxo de calor para todas as configurações possíveis. De facto, no caso representado na Figura A.7, a face 1 vê o cilindro, as faces 2 e 4 veem parcialmente o cilindro enquanto que nenhum fluxo de calor por radiação atinge a face 3. Assim, a face 1 corresponde à situação descrita pela Equação (A.6). Para a face 3, o fluxo de calor por radiação incidente é zero. O caso das faces 2 e 4 é mais complexo e a Equação (A.6) não pode ser aplicada diretamente porque o plano (da face) corta o cilindro.

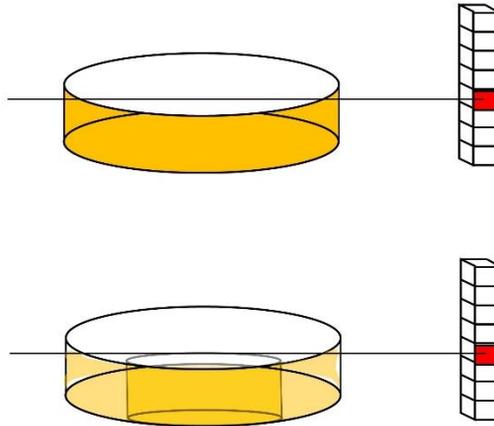


**Figura A.7 Exemplo da interação cilindro – coluna (vista superior)**

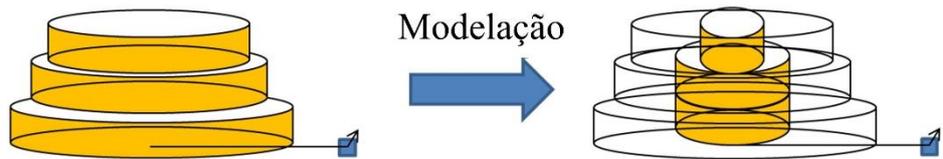
Sendo principalmente o ângulo de visão da superfície recetora que controla o fluxo de calor por radiação, a solução adotada é utilizar uma forma da superfície que levará a um fator de vista equivalente. O cilindro continua a ser utilizado, mas com a geometria modificada apresentada na Figura A.8 e Figura A.9. O diâmetro do cilindro é reduzido de forma a que o cilindro modificado seja completamente visível pela superfície recetora e consequentemente a Equação (A.6) pode ser aplicada. Um caso mais complexo com vários cilindros é apresentado na Figura A.10 que pode ser manipulado de forma similar.



**Figura A.8 Modelação do cilindro – vista superior**



**Figura A.9 Modelação do cilindro – vista 3d**



**Figura A.10 Caso complexo de modelação do cilindro**

O fator de vista entre um elemento plano infinitesimal e um anel num plano perpendicular é obtido através da Equação (A.9). Os parâmetros geométricos são representados na 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 apenas é válida se  $l > r_2$

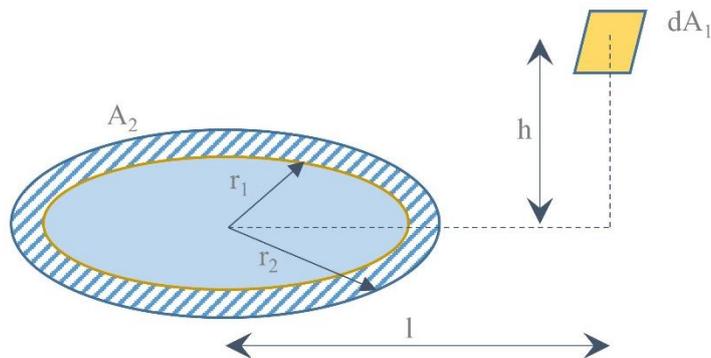
Onde:

$$H = h/l$$

$$R_1 = r_1/l$$

$$R_2 = r_2/l$$

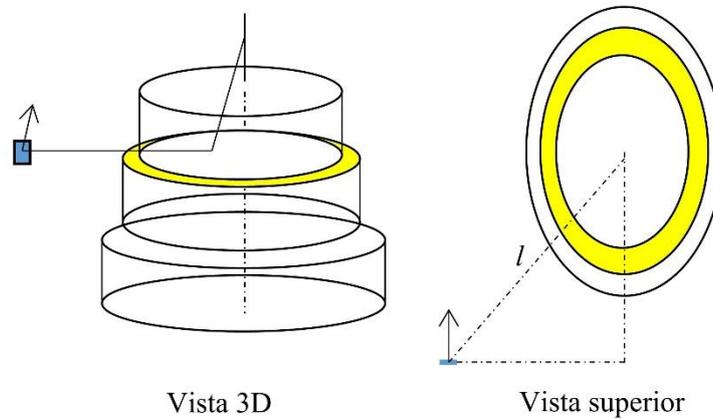
$l$  é a distância entre a face e centro do anel



**Figura A.11 Configuração anel – elemento plano**

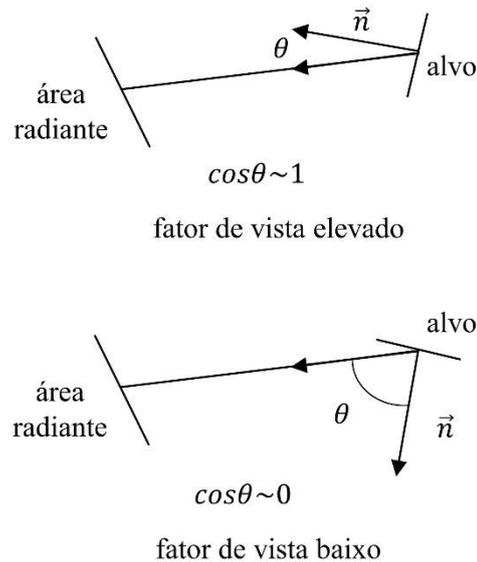
A parte anelar (anel  $z_i$ ) entre dois cilindros é considerada como uma superfície radiante (ver Figura A.12) e o fluxo de calor induzido é calculado através da Equação (A.9). Apenas é adicionado se  $z_j > z_i$  (i.e. se a face “vê” o anel).

É necessário aplicar regras adicionais de forma a abranger-se todas as configurações possíveis utilizando a Equação (A.9). Teoricamente, esta equação apenas é válida para um anel centrado no plano perpendicular ao alvo, o que na prática nem sempre acontece (ver Figura A.12)



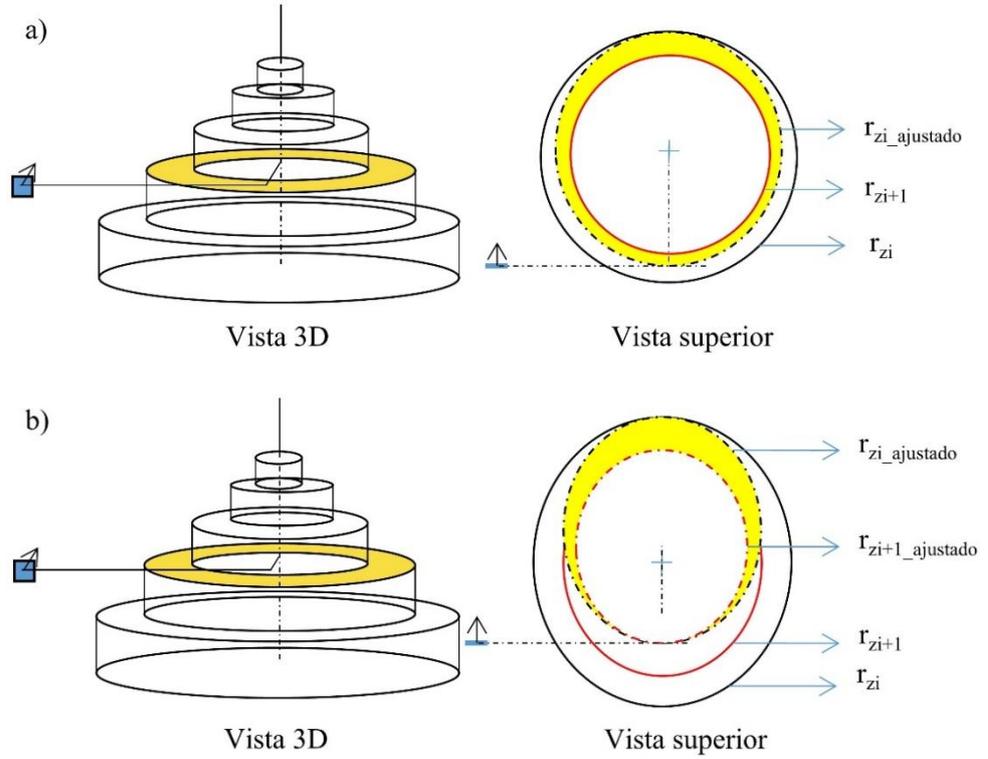
**Figura A.12 Modelação do anel (vista superior)**

A orientação do alvo tem um forte impacto nas trocas de fluxo de calor entre duas superfícies (Figura A.13). A Equação (A.9) corresponde ao caso em que o alvo é perpendicular ao fogo e dá o maior fator de vista (mais conservativo).



**Figura A.13 Influência da orientação do alvo**

Também é necessário ter em consideração a situação em que o anel, como para o cilindro, é parcialmente visível (ver Figura A.14). Neste caso, o raio exterior e interior do anel são reduzidos de forma a obter-se um anel visível utilizando o mesmo método aplicado para o cilindro. Nos exemplos representados na Figura, são apresentados dois casos, para o anel definido pelo seu raio interno  $r_{zi+1}$  e pelo seu raio externo  $r_{zi}$ . No caso a, apenas o raio  $r_{zi}$  deve ser ajustado enquanto no caso b os dois raios  $r_{zi}$  e  $r_{zi+1}$  são ajustados.



**Figura A.14 Manipulação de um caso complexo de modelação do anel**

O fluxo de calor por radiação absorvido por uma face é a soma dos fluxos de calor por radiação emitidos por todos os cilindros e anéis:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_j} = & \sum_i \sigma \cdot \epsilon \cdot ((\theta_f(z_i) + 273)^4 - (293^4)) \cdot \Phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \\ & + \sum_i \sigma \cdot \epsilon \cdot ((\theta_f(z_i) + 273)^4 - (293^4)) \cdot \Phi_{Ring\ z_i \rightarrow face_j} \end{aligned} \quad (A.10)$$

Finalmente, o fluxo de calor por radiação médio no segmento à altura  $z_j$  é calculado através da média de fluxo de calor por radiação das quatro faces para a largura  $l_i$  de cada face:

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

#### A.2.1.4 Fluxo de calor total absorvido por um segmento da coluna

Como indicado anteriormente, quando a coluna está fora da chama e o segmento considerado não está na camada superior de gases quentes, o fluxo de calor total recebido é igual ao fluxo de calor por radiação.

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

### A.2.2 Segmento de coluna no interior da camada superior de gases quentes

Na camada superior de gases quentes, o fluxo de calor convectivo não pode ser ignorado. O fumo também tem um forte impacto no fluxo de calor por radiação através do fenómeno absorção-emissão principalmente por fuligem. O fluxo de calor total absorvido por um segmento é calculado de acordo com as seguintes equações:

Primeiro, é introduzida a variável  $y$ :

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

Onde:

$d$  é a distância entre a coluna e o centro da área de incêndio (Figura 4.2)

$H$  é a distância entre a origem de incêndio e o teto

Se a origem do incêndio se localizar à altura  $z_{fire}$  então:

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

$L_h$  é obtido por:

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

$Q_h$ , é uma taxa de libertação de calor adimensional, obtida por:

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

$z'$  é definido por:

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

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

$Q^*$  é uma taxa de libertação de calor adimensional estimada de maneira similar ao  $Q_h$ :

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

O fluxo de calor incidente  $H_s$  é então calculado dependendo do 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, o fluxo de calor total absorvido pelo segmento  $z_j$  é:

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

### A.3 Coluna no interior da área de incêndio

Para uma coluna no interior da área de incêndio, o fluxo de calor convectivo é uma componente importante do fluxo de calor total. Para além disso, o conceito de chama sólida em que a superfície externa da chama irradia em direção a uma coluna já não é aplicável.

A NP EN 1991-1-2:2010<sup>[2]</sup> fornece um modelo para calcular o fluxo de calor recebido num ponto interior do incêndio. O modelo apresentado seguidamente é baseado nas equações do Eurocódigo com uma pequena modificação.

Novamente, se a chama atinge o teto, é feita uma distinção entre os segmentos da coluna que não estão na camada superior de gases quentes abaixo do teto e os que estão.

### A.3.1 Segmento da coluna fora da camada superior de gases quentes

Os segmentos da coluna à altura  $z_j$  localizados entre o pavimento e a altura ( $h_{teto} - h_{camada\ superior\ de\ gases\ quentes}$ ) são envolvidos por uma camada de gases quentes à temperatura obtida através da Equação (A.4). O fluxo de calor é então calculado como:

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

Onde:

$\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção = 35 W/(m<sup>2</sup>K) de acordo com a NP EN 1991-1-2:2010

O fluxo de calor total absorvido pelo segmento  $z_j$  é calculado como indicado seguidamente:

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

### A.3.2 Segmento no interior da camada superior de gases quentes

Para os segmentos da coluna localizados na camada superior de gases quentes (entre ( $h_{teto} - h_{camada\ superior\ de\ gases\ quentes}$ ) e  $h_{teto}$ ), o fluxo de calor total recebido é tido como o máximo entre  $H_s$  calculado utilizando o conjunto de Equações (A.13) a (A.20) e  $\dot{h}_{inside\ flame}$  calculado com a Equação (A.22).

## A.4 Fluxo de calor total recebido por um segmento da coluna

O modelo apresentado na Secção A.2 e A.3 assume apenas uma fonte de incêndio. No entanto, é comum ter cenários de incêndio onde estão envolvidas várias fontes de incêndio. Nesses casos, podem ser aplicadas simples regras de adição.

Quando a coluna está fora da área de incêndio e fora da camada superior de gases quentes, o fluxo de calor por radiação recebido em qualquer face da coluna é a soma dos fluxos de calor por radiação emitidos por cada fonte de incêndio limitado superiormente ao valor de 100 kW/m<sup>2</sup>.

Considerando  $n$  fontes de incêndio:

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

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

Não há alteração no procedimento que fornece o fluxo total médio de calor recebido por um segmento de coluna.

Para todos os outros casos, o fluxo de calor total absorvido é obtido adicionando-se todos os fluxos de calor provenientes de cada fonte de incêndio assumindo-se novamente um limite superior de 100 kW/m<sup>2</sup>.



## ANEXO B APLICAÇÃO A COLUNA FORA DA ÁREA DE INCÊNDIO

Este anexo fornece um exemplo que mostra a aplicação prática do modelo. Note-se que as técnicas descritas na Secção 4.2 permitem ao projetista determinar o aumento da temperatura numa coluna sem necessidade de aplicar o complexo procedimento numérico descrito neste documento.

### B.1.1 Descrição do caso

Este exemplo é para uma coluna de aço localizada fora da área de incêndio sem teto. Segmentos de coluna dentro da área de incêndio ou fora da área de incêndio, mas dentro da camada superior de gases quentes não apresentam dificuldades especiais, uma vez que, o método utilizado aplica as equações clássicas e simples indicadas na NP EN 1991-1-2:2010.

A Figura B.1 apresenta a configuração geral considerada. A coluna de aço tem uma secção transversal HEB 300 e está localizada em frente a um recipiente de 4 m de diâmetro. A distância entre o centro do recipiente e a face mais próxima do segmento da coluna de aço é 2.5 m. No recipiente, considera-se que o combustível arde a uma taxa constante de 1000 kW/m<sup>2</sup>.

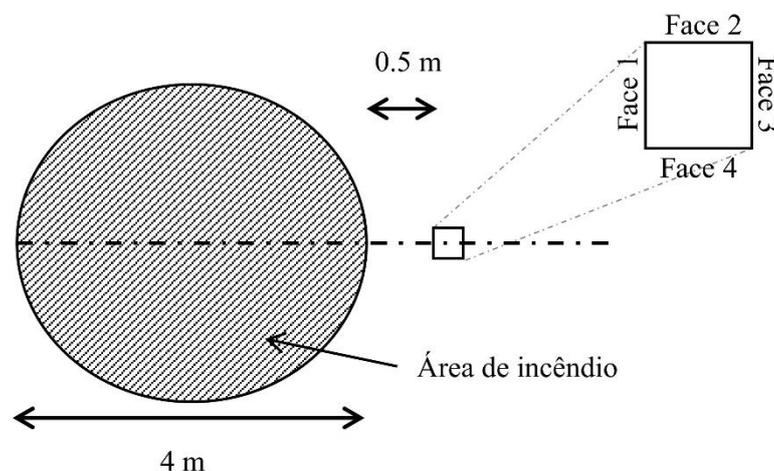


Figura B.1 Posição relativa da coluna e do fogo

### B.1.2 Análise preliminar

Em certos aspetos o cálculo pode ser simplificado. O número de cálculos é proporcional ao número de segmentos. A Equação (A.6) é significativamente simplificada se os segmentos estiverem a alturas que sejam um múltiplo da altura do cilindro utilizado para modelar a chama (0.5 m). Neste caso a variável  $y$  é igual a 0 (ver Figura B.2) e a Equação (A.6) reduz-se a:

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

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

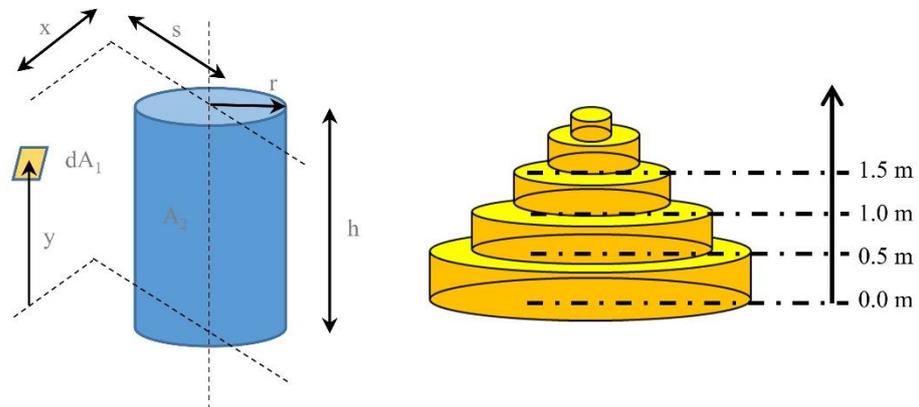
$$L_2 = H \frac{H^2 + A + 1}{\sqrt{(H^2 + A - 1)^2 + 4H^2}} \cos^{-1} \left( \frac{H^2 - A + 1}{\sqrt{A}(H^2 + A - 1)} \right)$$

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

Onde:

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

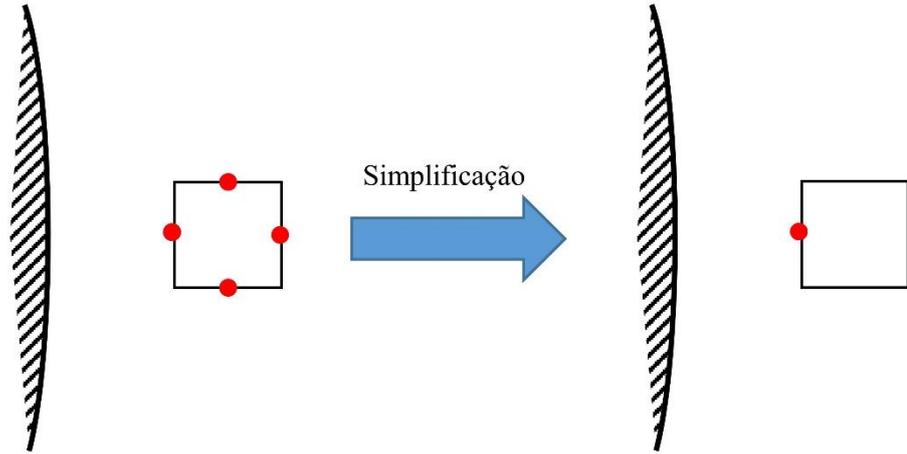
Conseqüentemente, os cálculos são realizados para segmentos a 0 m, 0.5 m, 1.0 m e assim sucessivamente. Nos parágrafos seguintes, o fluxo de calor é calculado para um segmento a 1.0 m de altura.



**Figura B.2** Configuração cilindro-elemento plano (esquerda) – altura dos segmentos de cálculo (direita)

Em segundo lugar, assume-se que para esta configuração nenhum fluxo de calor por radiação atinge a face 3. As faces 2 e 3 são simétricas e receberão o mesmo fluxo de calor.

A simplificação final diz respeito à posição onde é realizado o cálculo do fluxo de calor nas faces. Embora deva ser feito no centro de cada face, (ver Figura B.3), como simplificação os cálculos são realizados na mesma posição do centro da Face 1. Como esta face é a mais próxima do recipiente, esta simplificação faz com que se obtenha um fluxo de calor mais elevado sendo, portanto, uma simplificação conservativa.



**Figura B.3** Simplificação para a posição de cada face para o cálculo do fluxo de calor

### B.1.3 Cálculo do fluxo de calor

Através das Equações (A.2) a (A.5), é possível determinar as propriedades de cada cilindro e anel. Neste caso a altura da chama é 6.15 m (ver Figura B.9). O fluxo de calor recebido por cada face é determinado separadamente.

Para a Face 1, pode ser aplicada diretamente a Equação (B.1) para calcular o fator de vista entre a face 1 e os cilindros. No entanto, a regra da adição deve ser aplicada dependendo da altura relativa entre o cilindro e a face.

Considerando a posição representada na Figura B.4 para a Face 1 e um cilindro  $C_i$  (compreendido entre  $z_i$  e  $z_{i+1}$ ), a posição do segmento no sistema de coordenadas local  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  pode ser retirada como  $(s_f, x_f, z_f)$  que é (2.5, 0.0, 1.0). As quatro situações indicadas nas Figura B.5 a B.8 podem ser encontradas e decompostas como representado na mesma Figura.

Se definirmos  $\phi_i$  (respetivamente  $\phi_{i+1}$ ), o fator de vista entre a Face 1 e o cilindro de altura  $|z_i - z_f|$  (respetivamente  $|z_{i+1} - z_f|$ ) e raios  $r_i$ :

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

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

Assim o fator de vista  $\phi$  entre a Face 1 e o cilindro  $C_i$  é igual a:

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

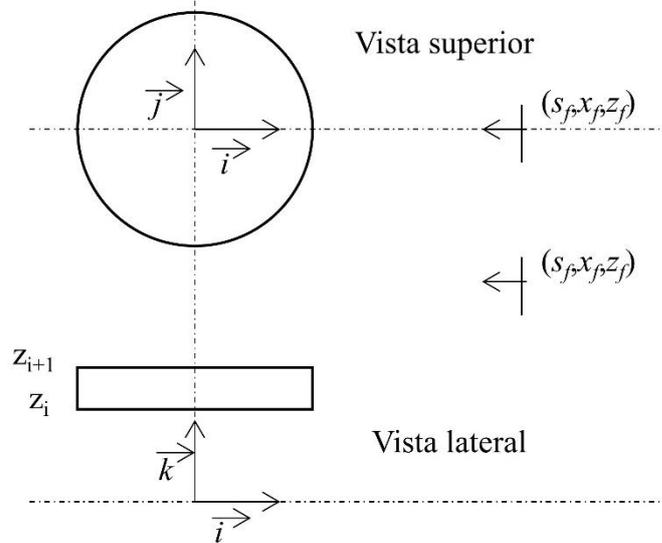
A última parte diz respeito ao fluxo de calor induzido pelos anéis. Como o segmento está localizado a 1.0 m de altura, apenas há um anel (a 0.5 m) abaixo do segmento. Aplicando a Equação (A.3), o raio (externo e interno) do anel pode ser calculado como indicado seguidamente:

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

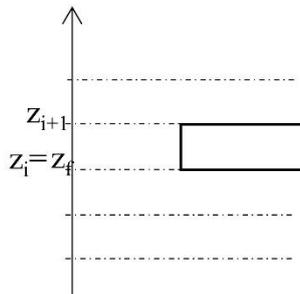
$$r(z_{i+1} = 0.5) = 1.84 \text{ m}$$

Finalmente o fluxo de calor incidente é calculado somando-se todas as contribuições (Equação (A.9)). Obtendo-se um calor incidente na Face 1 de  $76.36 \text{ kW/m}^2$  e, assumindo uma emissividade de 0.7, um fluxo de calor absorvido de  $53.45 \text{ kW/m}^2$ .

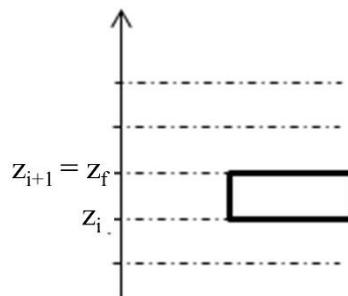
A Figura B.9 apresenta a implementação deste procedimento numa folha de cálculo *excel* para este exemplo.



**Figura B.4** Coordenadas da face 1



**Figura B.5** Posição relativa da face 1: cilindro e decomposição, Caso a



**Figura B.6** Posição relativa da face 1: cilindro e decomposição, Caso b

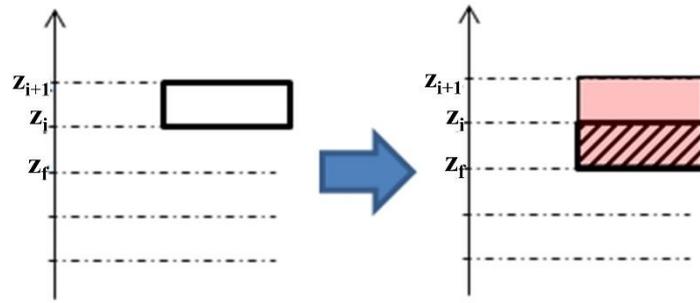


Figura B.7 Posição relativa da face 1: cilindro e decomposição, Caso c

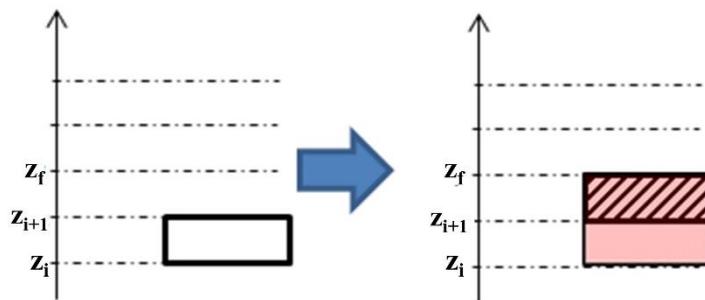


Figura B.8 Posição relativa da face 1: cilindro e decomposição, Caso d

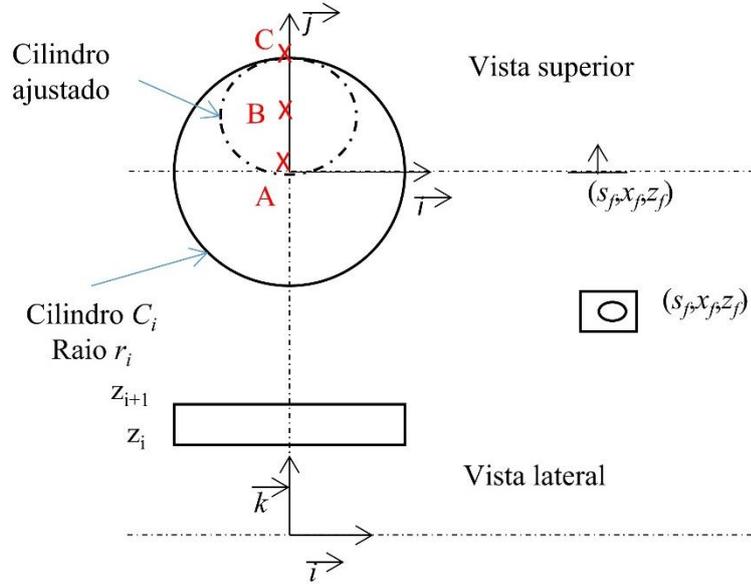
Input data					Constant		Section coordinate			Intermediate variables	
HRR	Dfire	Q	Q	hf	$\sigma$	Tab <sub>s</sub>	sf	xf	zf	$z_{virt}$	l
kW/m <sup>2</sup>	m	W	MW	m			m	m	m		
1000	4	12566370.6	12.57	6.15	5.67E-08	273.15	2.5	0	1	-0.46	2.5

zi	Tf	ri	F <sub>cylinder_zi</sub>	F <sub>ring_zi</sub>	Flux <sub>face1</sub>	Cylinder								Ring		
						Fi	Fi+1	S	X	A	Hi	Hi+1	zi-zf	zi+1-zf	H	Ri
m	°C	m	-	-	kW/m <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	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 <sup>2</sup>										
Absorbed heat flux on face 1					53.45	kW/m <sup>2</sup>										

Figura B.9 Exemplo de folha *excel* para cálculo do fluxo de calor incidente na face 1

Para a face 2 (e face 4), a Equação (A.9) não pode ser aplicada diretamente uma vez que parte da chama não é visível. Para a face 2 e um cilindro  $C_i$  (compreendido entre  $z_i$  e  $z_{i+1}$ ), a posição da face 2 é definida no sistema de coordenadas local  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  como  $(s_f, x_f, z_f)$  (Figura B.10). Como mencionado na Secção anterior, o cilindro  $C_i$  é ajustado e são introduzidos os pontos adicionais A, B e C. A parte mais complexa é a caracterização deste cilindro ajustado.



**Figura B.10 Coordenadas da face 2**

O ponto A corresponde ao ponto com a mínima coordenada y e o  $r_{min}$  para o cilindro ajustado é:

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

O ponto C corresponde ao ponto com a máxima coordenada y e o  $r_{max}$  para o cilindro ajustado é:

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

O ponto B corresponde ao centro do cilindro ajustado:

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

O raio do cilindro ajustado é:

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

Isto permite obter os parâmetros que serão utilizados na Equação (B.1) para determinar o cilindro ajustado.

Para o cilindro  $C_0$  entre 0 m e 0.5 m, o raio inicial é 2 m, então:

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

A regra da adição deve ser utilizada dependendo da altura relativa da face 2 e do cilindro modificado como para a face 1:

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

Assim o fator de vista  $\Phi$  entre a face 2 e o cilindro ajustado é igual a:

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

O fluxo de calor por radiação emitido pelos anéis é de novo limitado ao anel localizado à altura de 0.5 m e mais precisamente ao anel ajustado definido pelo seu raio interno e externo. Eles correspondem aos raios do cilindro ajustado anteriormente calculado para o raio exterior (1 m). Para o raio interior, o raio inicial de 1.84 m (ver o valor de  $r_i$  à altura  $z_i = 0.5$  m na Figura B.11) é reduzido para 0.92 m.

O fluxo de calor incidente na Face 2 é a soma de todas as contribuições da chama sólida ajustada sendo igual a 8.57 kW/m<sup>2</sup> e com uma emissividade para a coluna de 0.7, o fluxo de calor por radiação absorvido é 6.00 kW/m<sup>2</sup>. A Figura B.11 mostra a implementação deste procedimento numa folha de cálculo *excel* para este caso.

Assim, o fluxo de calor por radiação absorvido por cada face é:

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

Como a largura de cada face de um HEB 300 é 0.3 m, o fluxo de calor total recebido por um segmento com 1.0 m de altura é:

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

zi	Tf	ri	F <sub>cylinder_zi</sub>	F <sub>ring_zi</sub>	Flux <sub>face2</sub>	Ring		
m	°C	m	-	-	kW/m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>		
Absorbed heat flux by face 2					6.00	kW/m <sup>2</sup>		

Input data				
HRR	Dfire	Q	Q	hf
kW/m <sup>2</sup>	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 <sub>virt</sub>	l
5.67E-08	273.15	-0.46	2.5

Modified cylinder / ring				Cylinder									
rmin	rmax	ri_adjusted	Y <sub>center</sub>	Fi	Fi+1	s	S	X	A	Hi	Hi+1	z <sub>i</sub> -z <sub>i+1</sub>	z <sub>i+1</sub> -z <sub>i</sub>
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	7.00

Figura B.11 Exemplo de folha excel para cálculo o fluxo de calor incidente na face 2



## ANEXO C NOMOGRAMAS

A Table C.1 fornece um resumo dos nomogramas fornecidos neste Anexo.

**Table C.1** Resumo dos nomogramas

Figura Número	D (m)	HRR (kW/m <sup>2</sup> )		Página
		(kW/m <sup>2</sup> )	(MW)	
C.1	2	250	0.8	64
C.2	2	500	1.6	65
C.3	2	1000	3.1	66
C.4	2	1500	4.7	67
C.5	3	250	1.8	68
C.6	3	500	3.5	69
C.7	3	1000	7.1	70
C.8	3	1500	10.6	71
C.9	4	250	3.1	72
C.10	4	500	6.3	73
C.11	4	1000	12.6	74
C.12	4	1500	18.8	75
C.13	6	250	7.1	76
C.14	6	500	14.1	77
C.15	6	1000	28.3	78
C.16	6	1500	42.4	79
C.17	8	250	12.6	80
C.18	8	500	25.1	81
C.19	8	1000	50.3	82
C.20	9	250	15.9	83
C.21	9	500	31.8	84
C.22	9	750	47.7	85
C.23	10	250	19.6	86
C.24	10	500	39.3	87

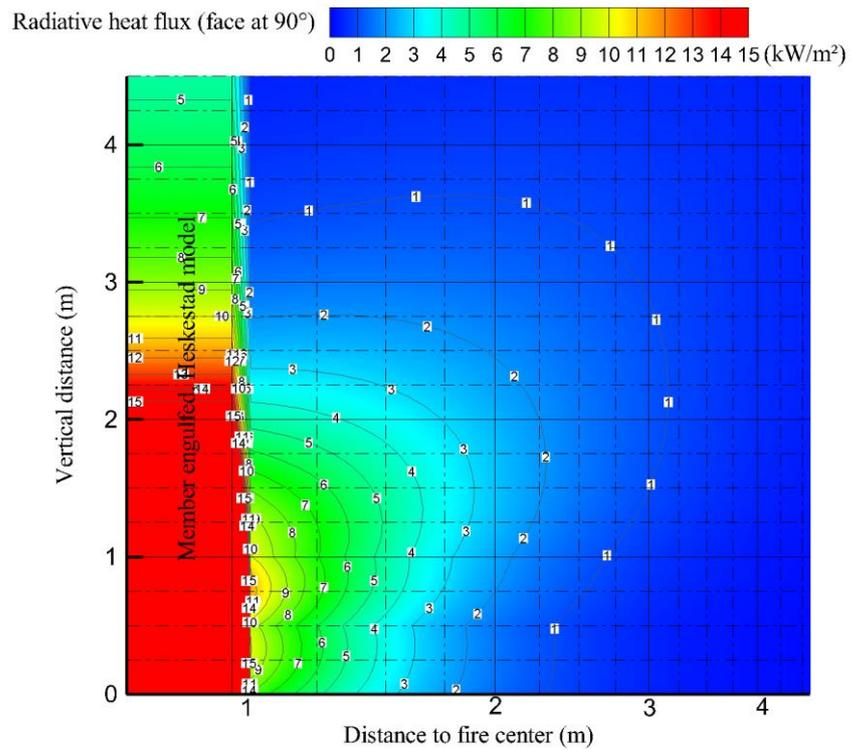
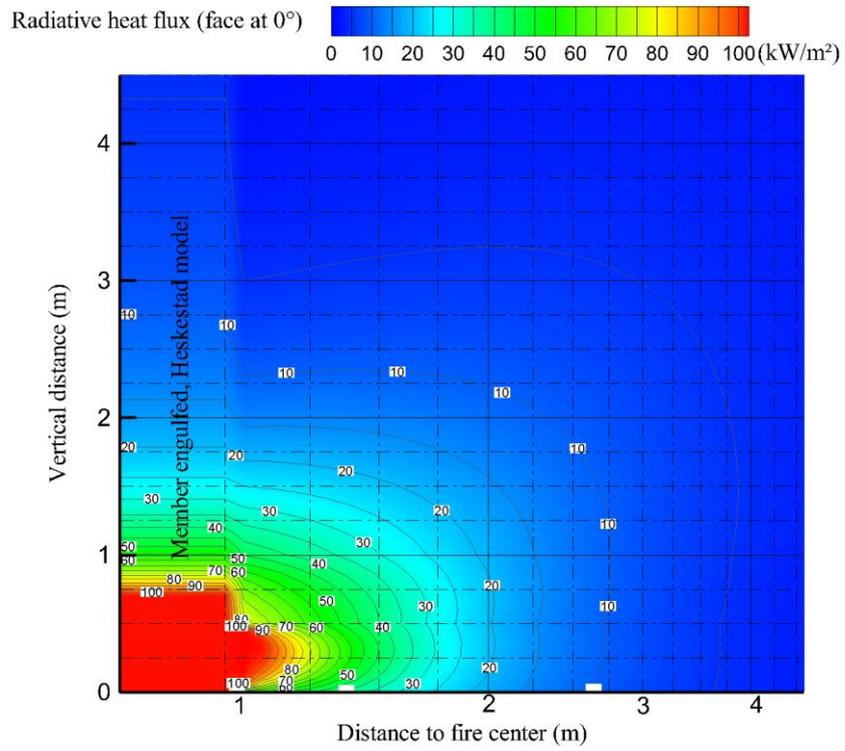


Figura C.1 Nomograma para  $D = 2 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

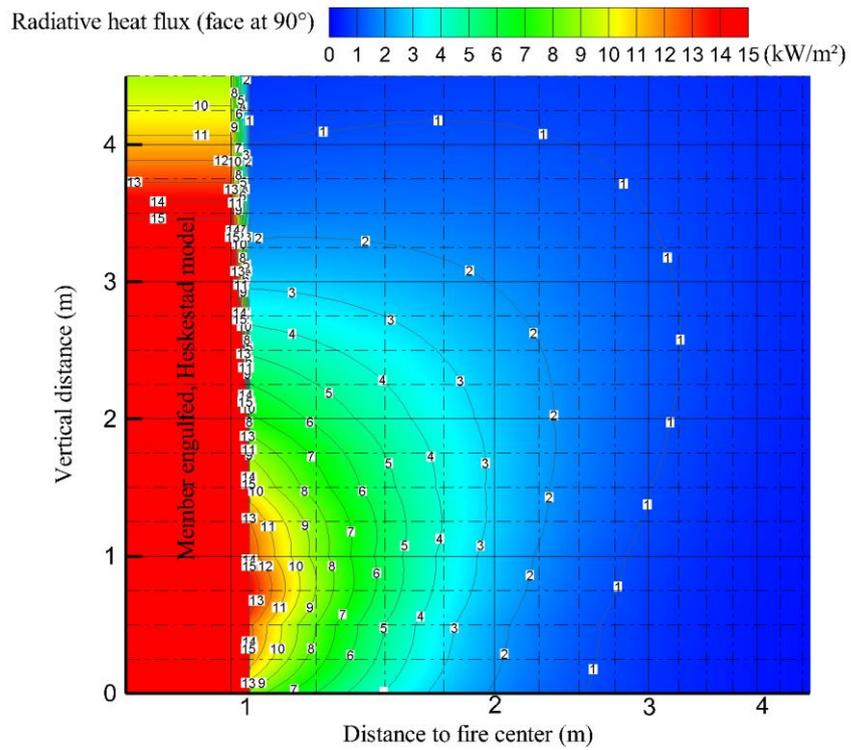
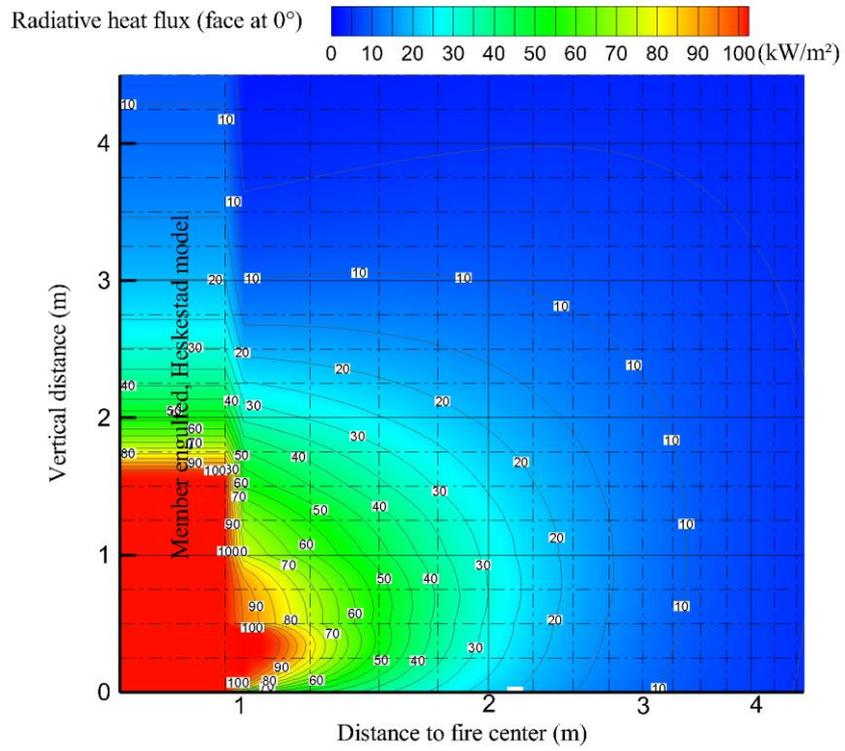


Figura C.2 Nomograma para  $D = 2 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

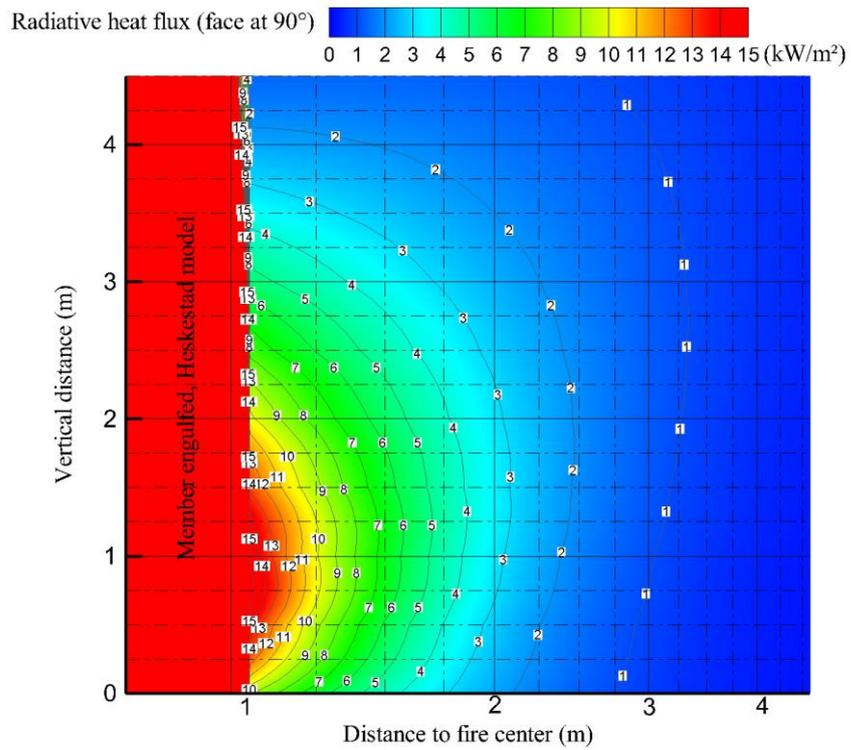
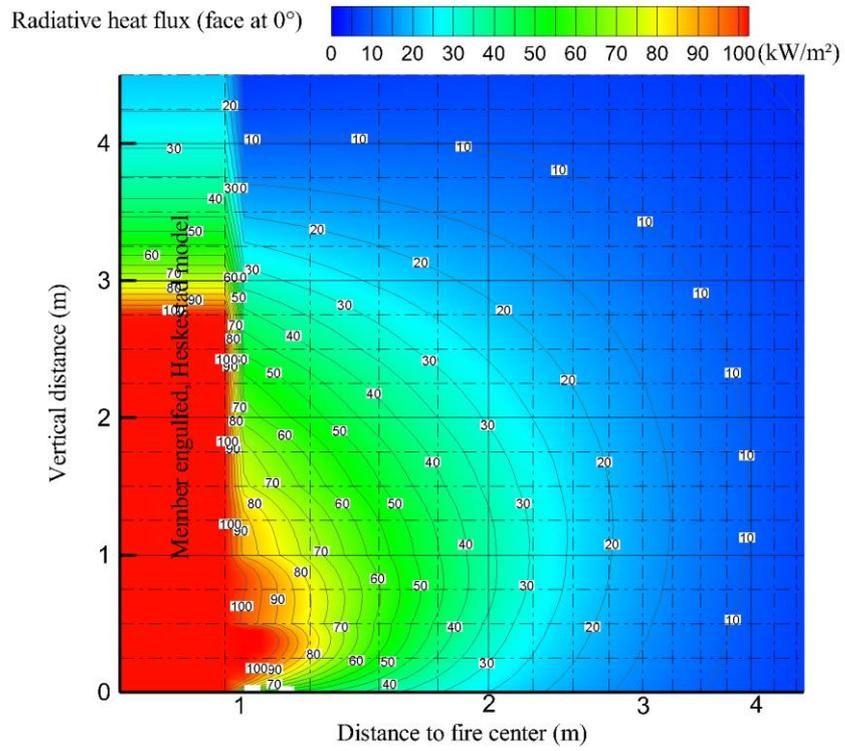


Figura C.3 Nomograma para  $D = 2 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

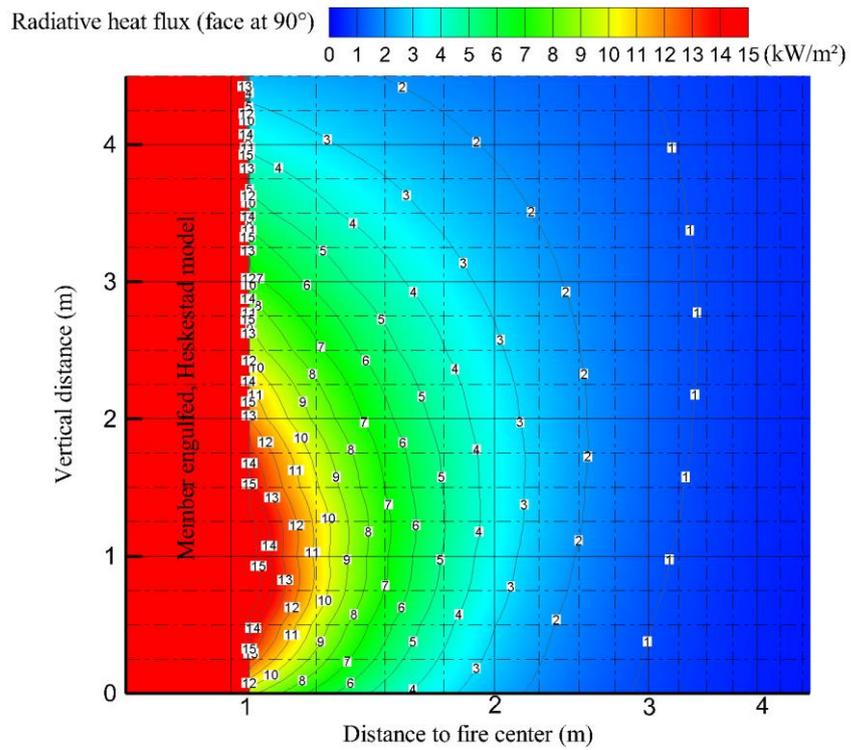
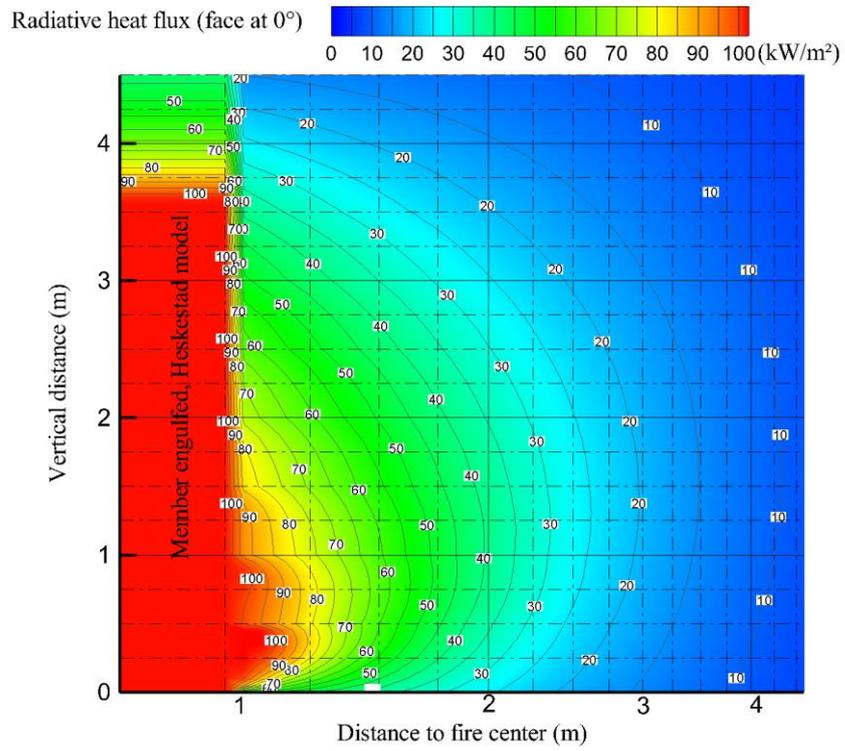


Figura C.4 Nomograma para  $D = 2 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

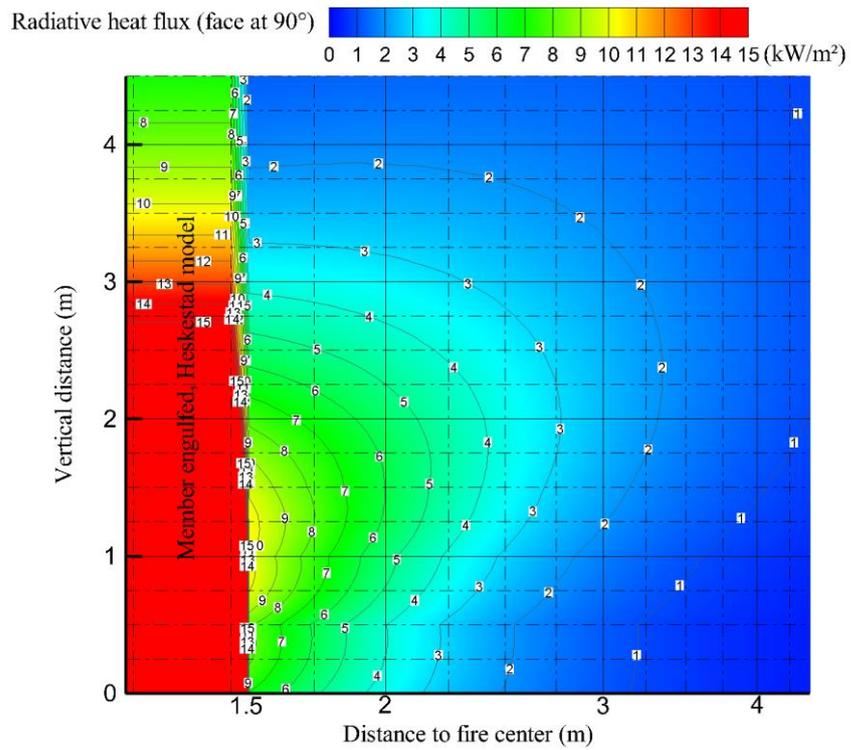
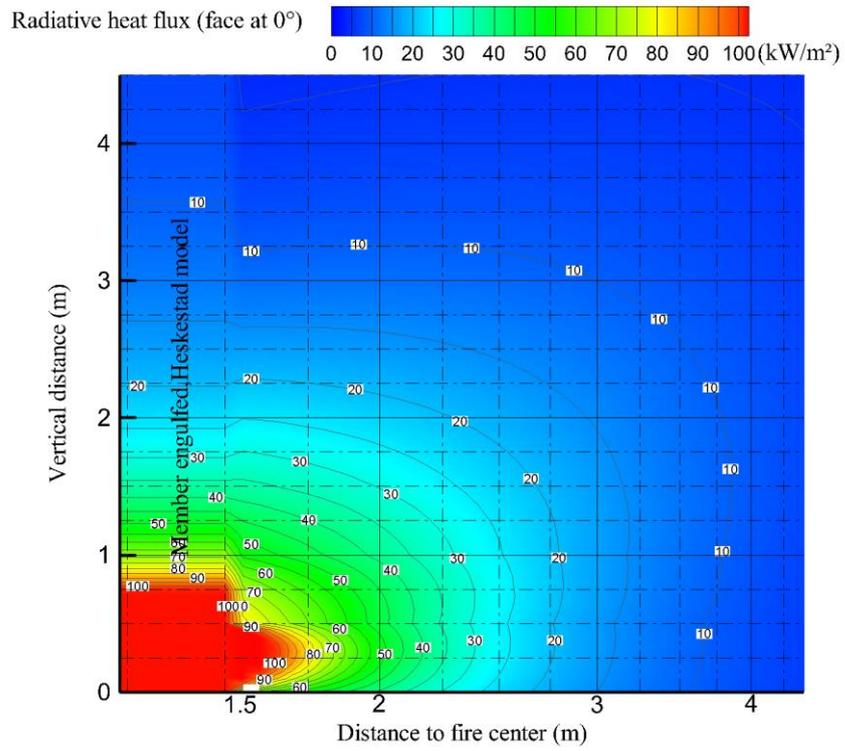


Figura C.5 Nomograma para  $D = 3 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

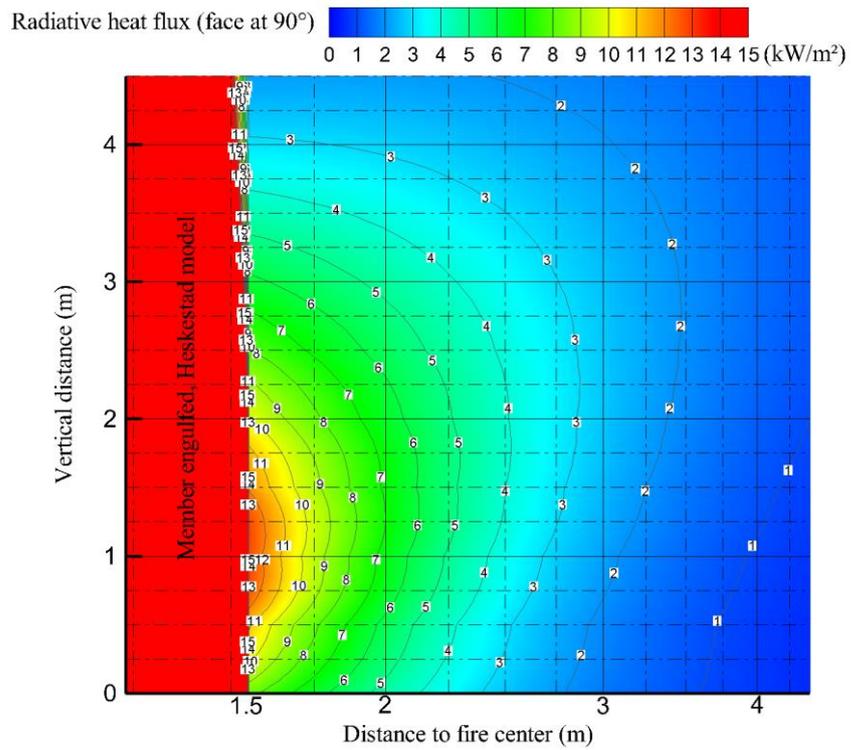
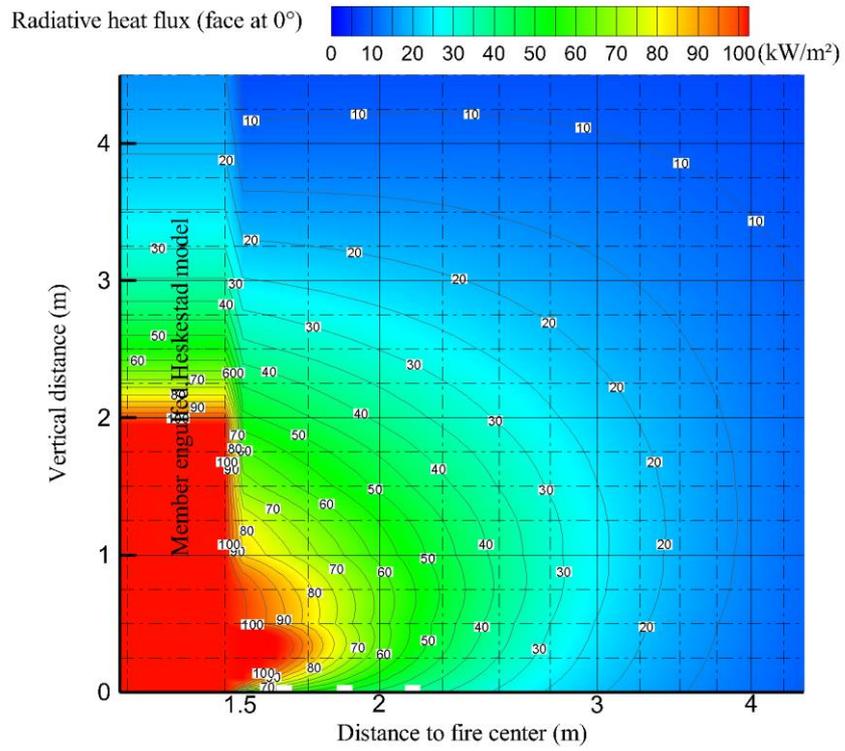


Figura C.6 Nomograma para  $D = 3 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

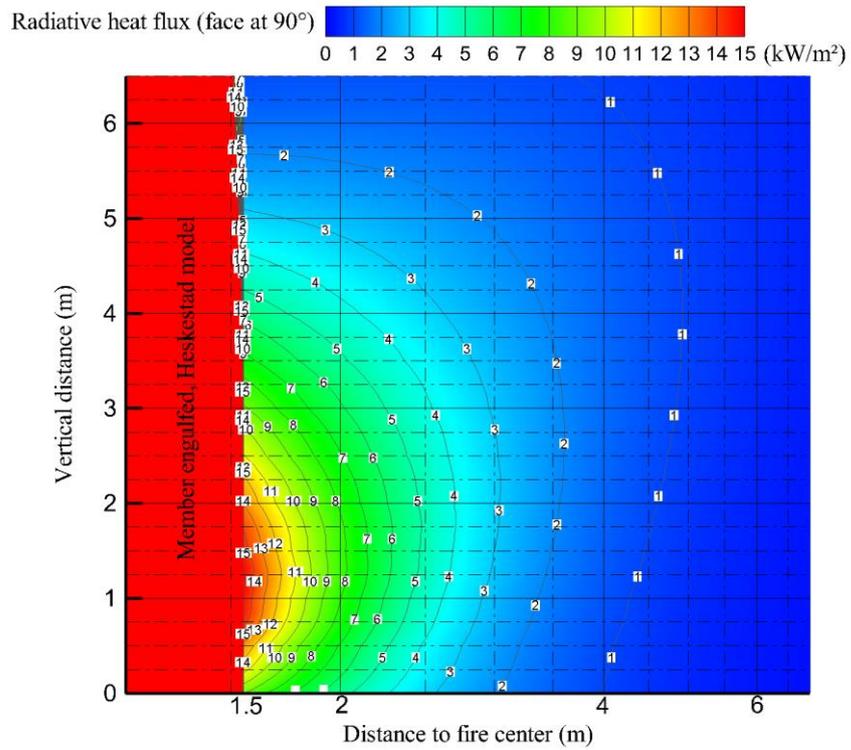
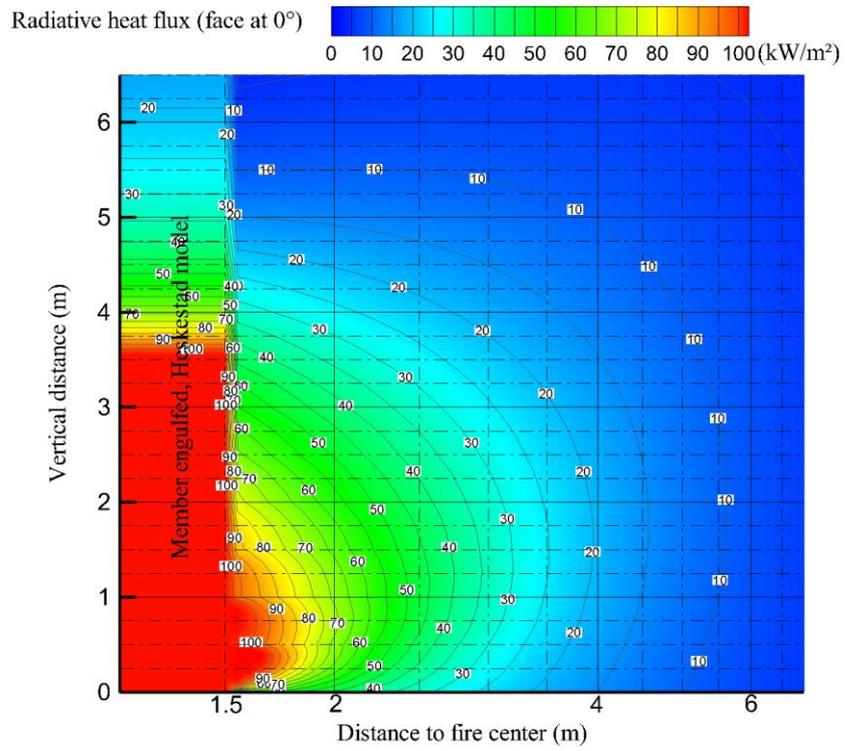


Figura C.7 Nomograma para  $D = 3 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

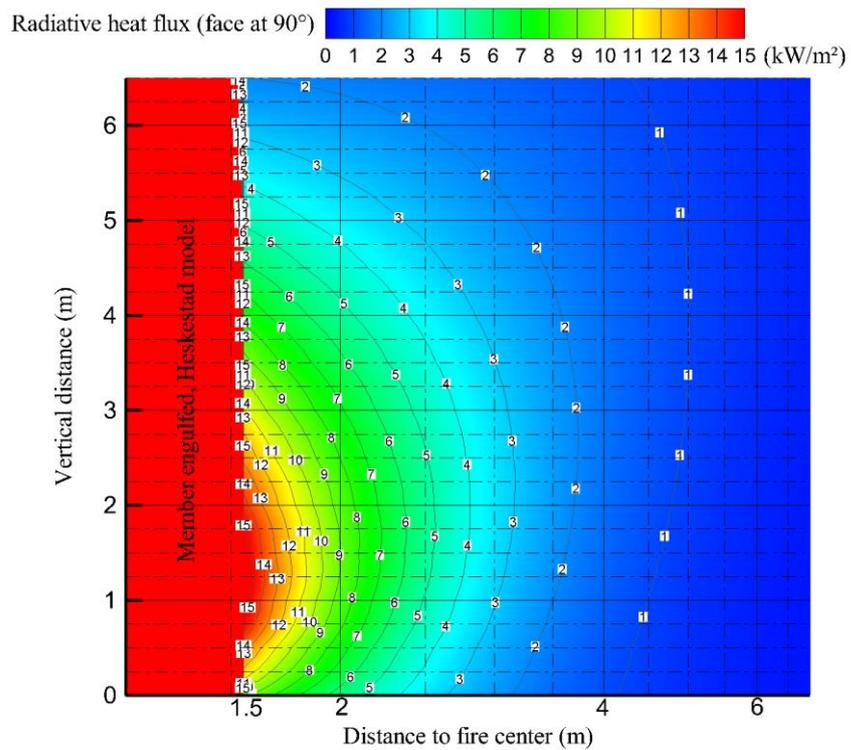
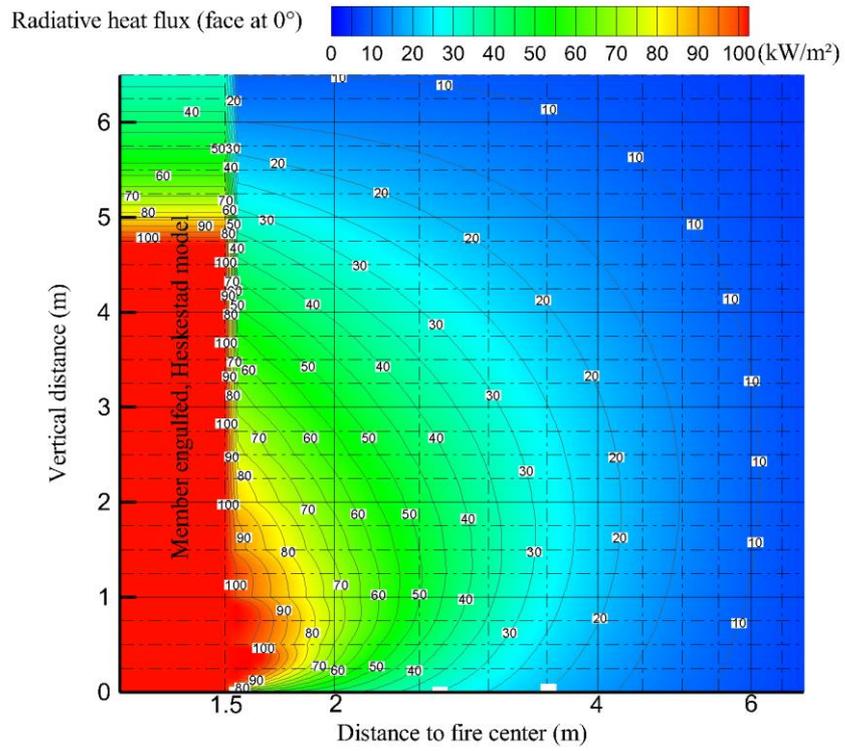


Figura C.8 Nomograma para  $D = 3 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

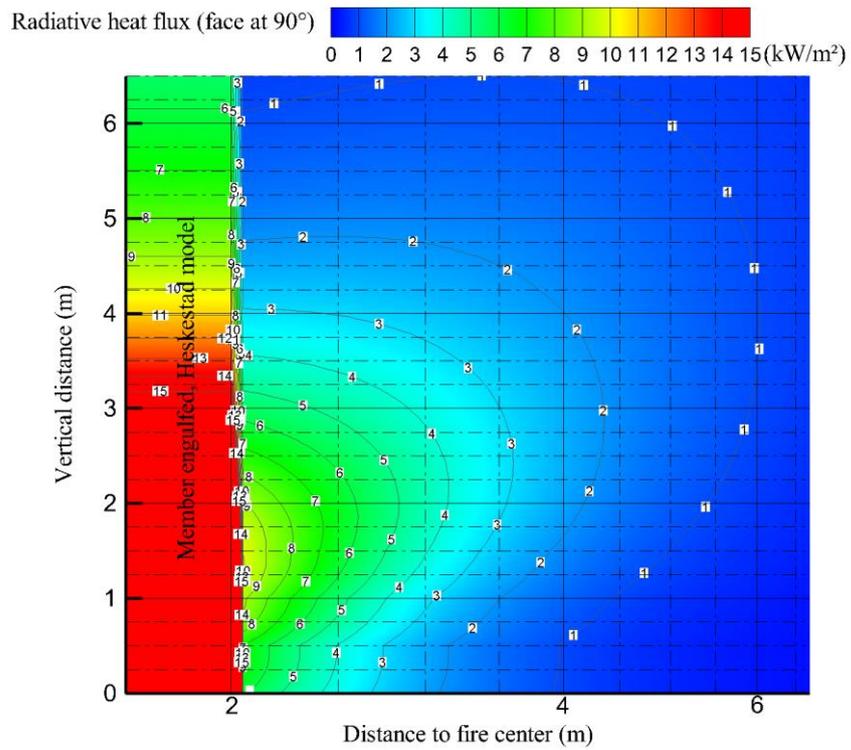
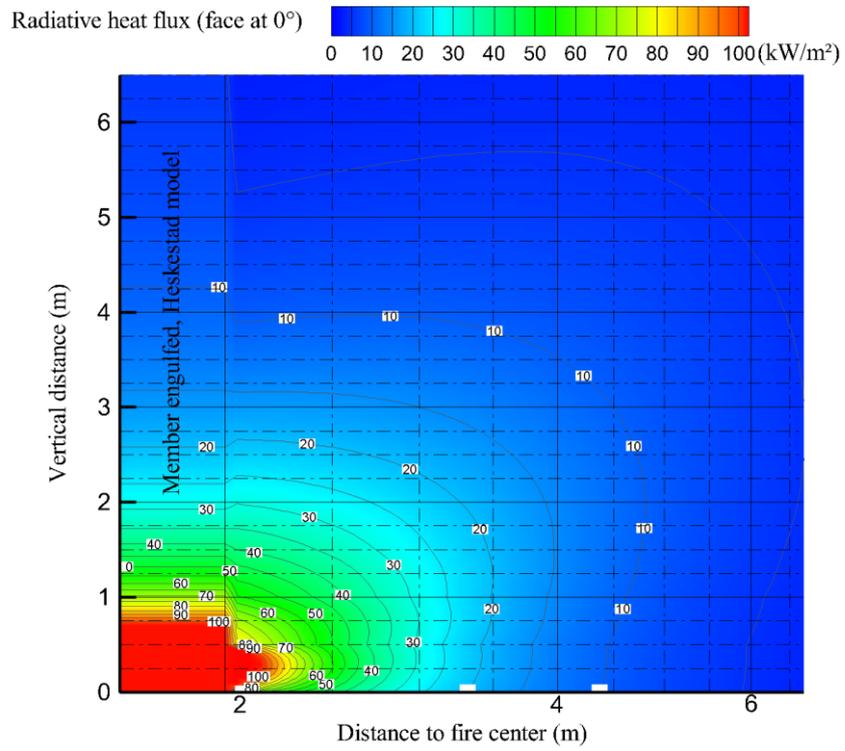


Figura C.9 Nomograma para  $D = 4 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

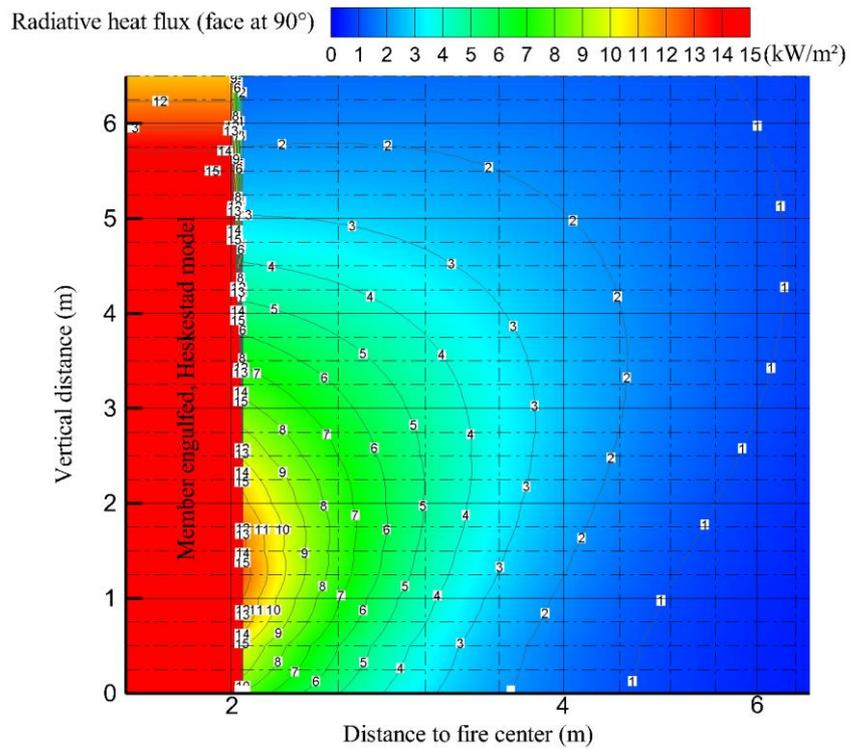
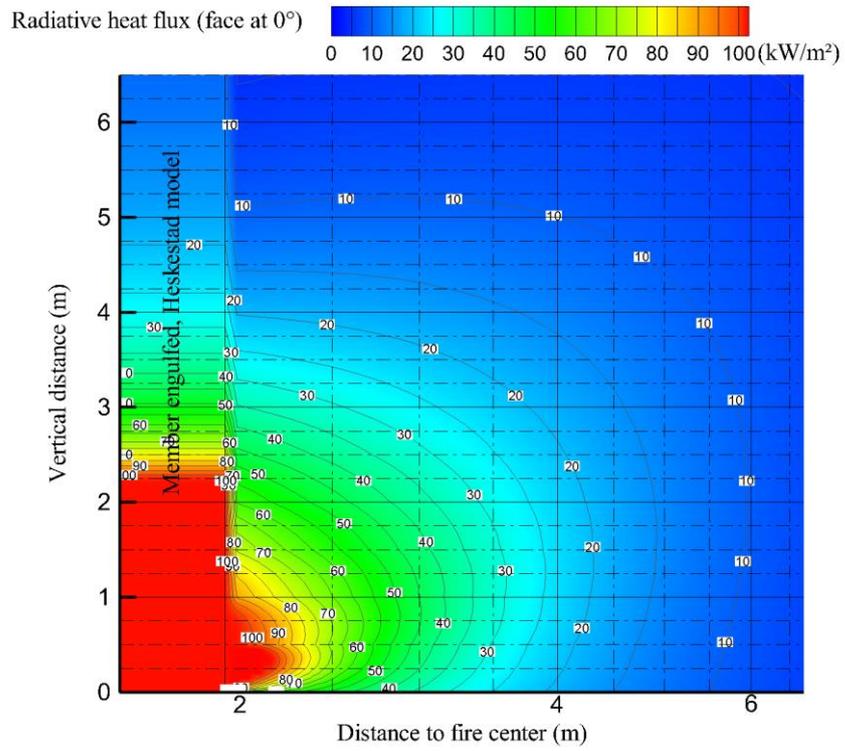


Figura C.10 Nomograma para  $D = 4 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

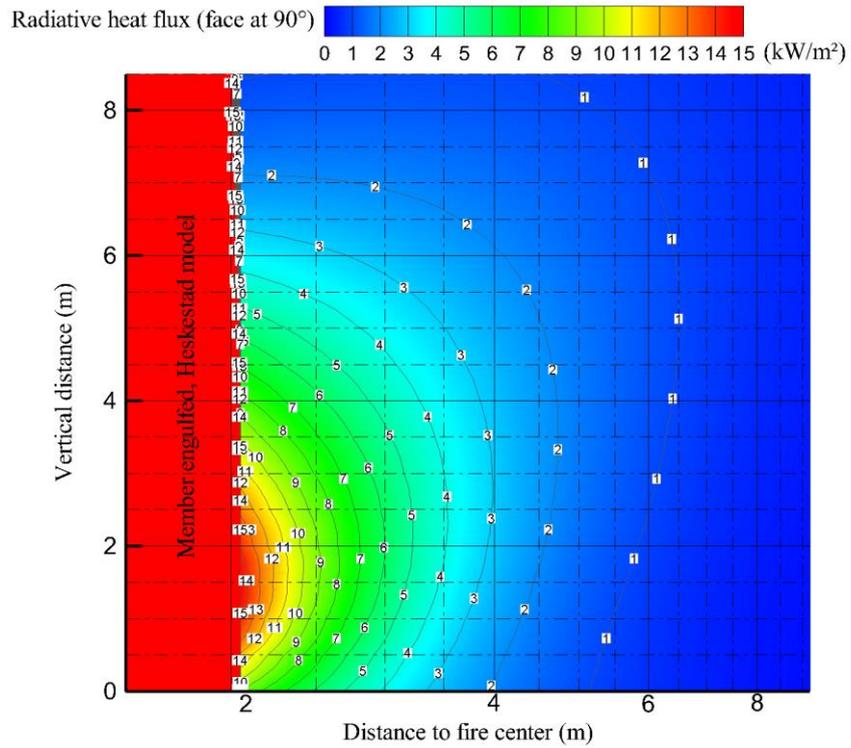
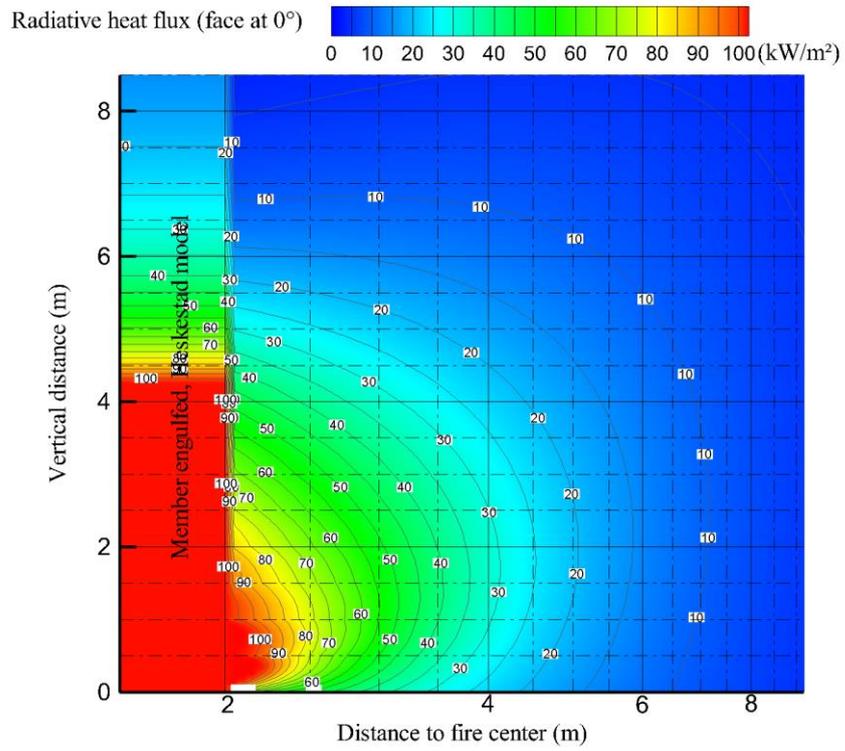


Figura C.11 Nomograma para  $D = 4 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

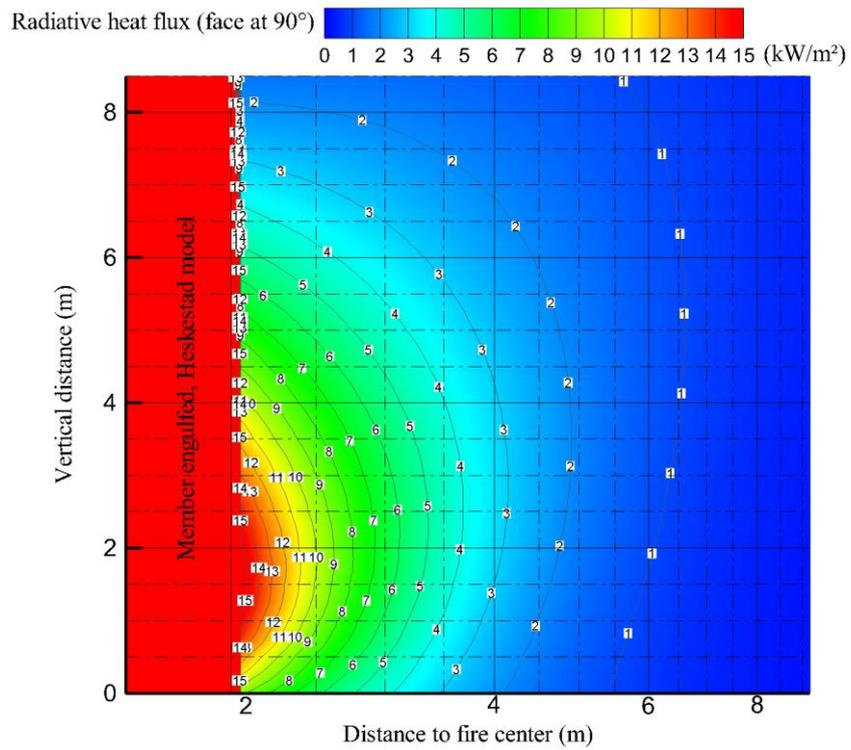
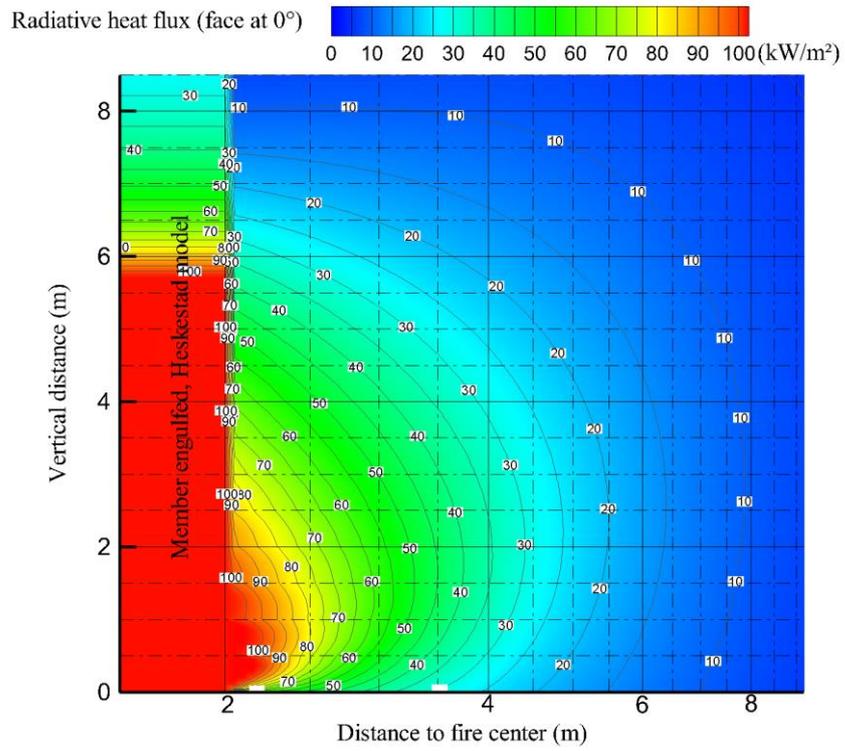


Figura C.12 Nomograma para  $D = 4 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

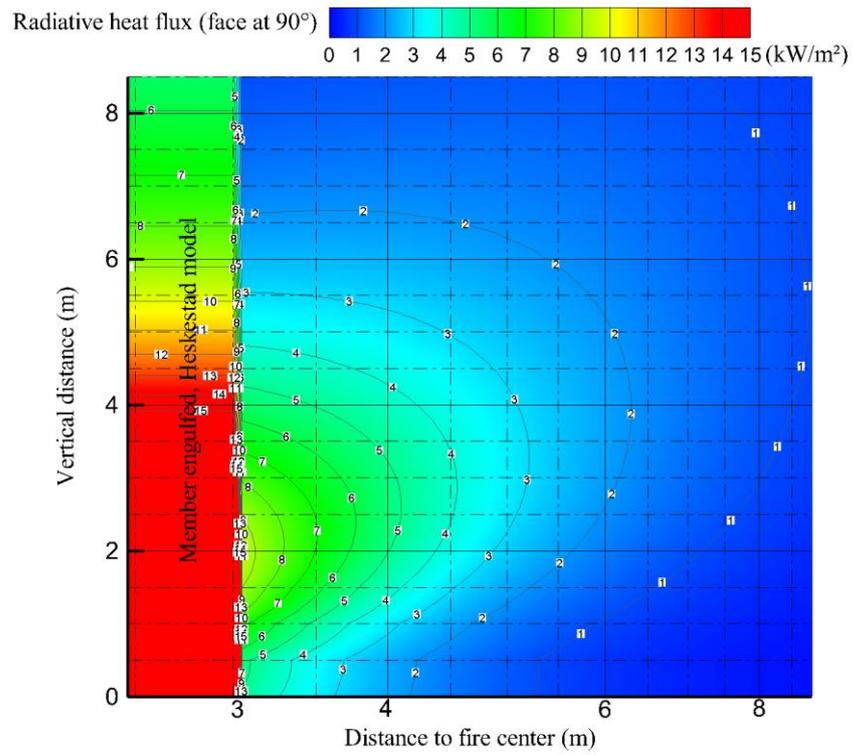
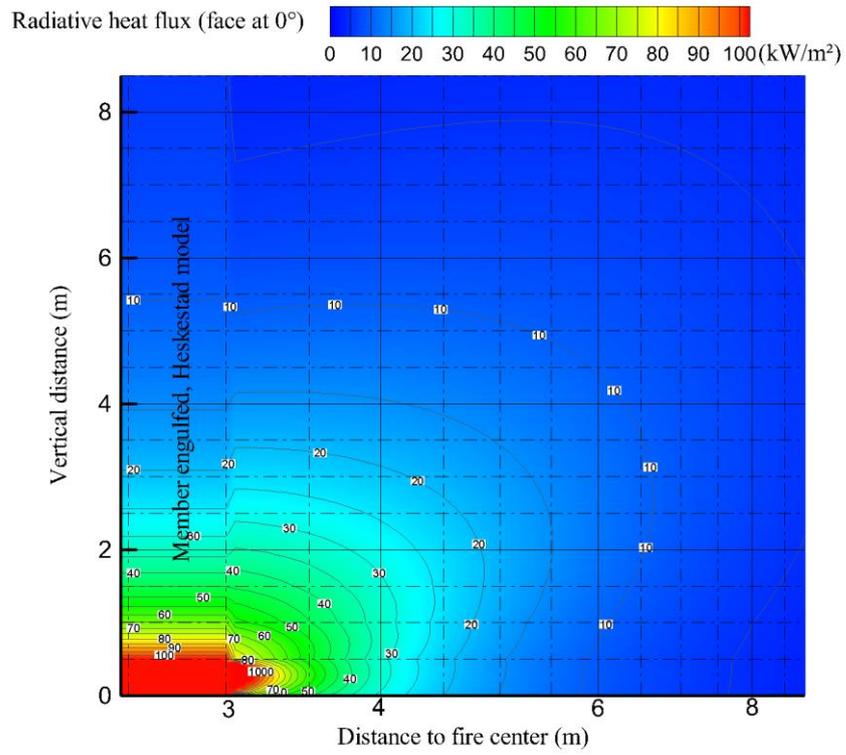


Figura C.13 Nomograma para  $D = 6 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

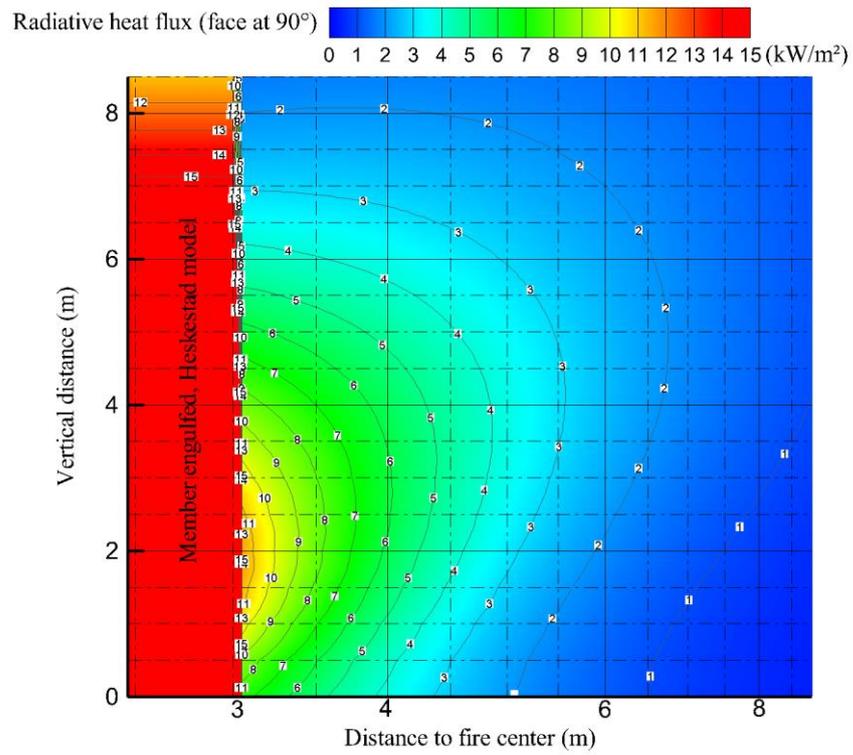
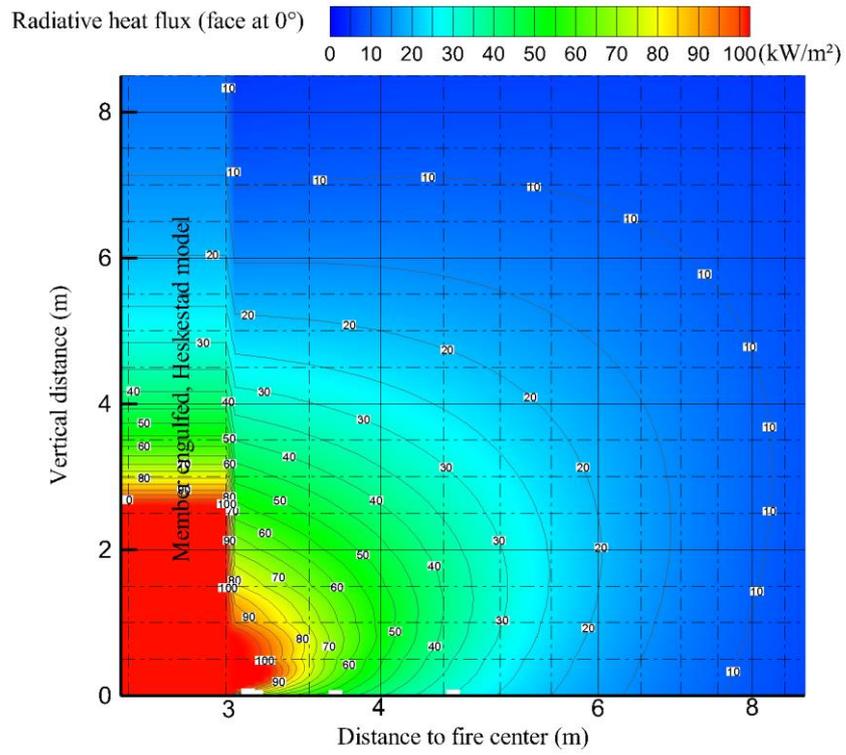


Figura C.14 Nomograma para D = 6 m e HRR = 500 kW/m<sup>2</sup>

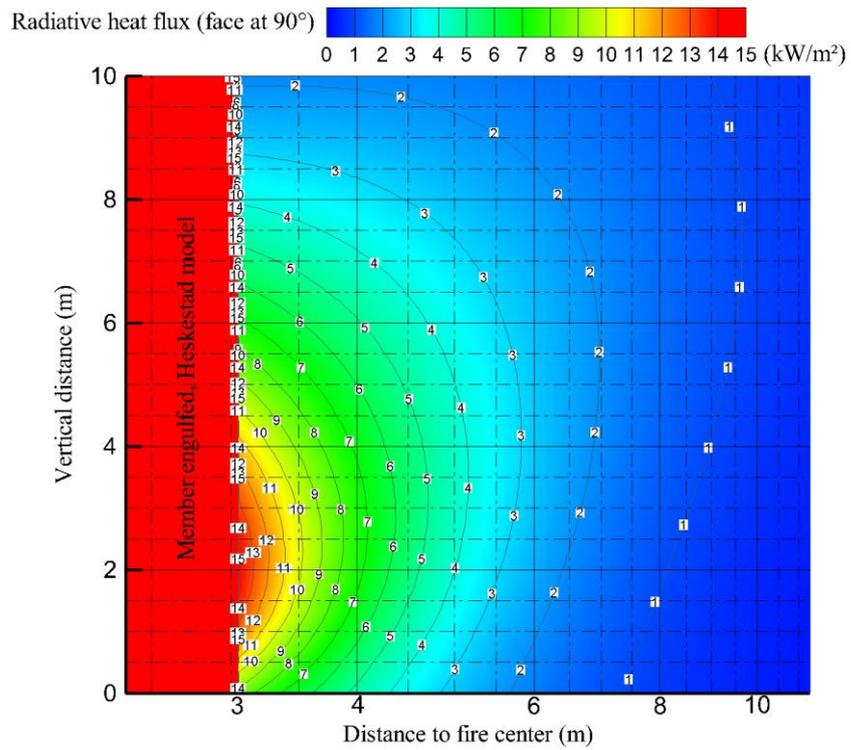
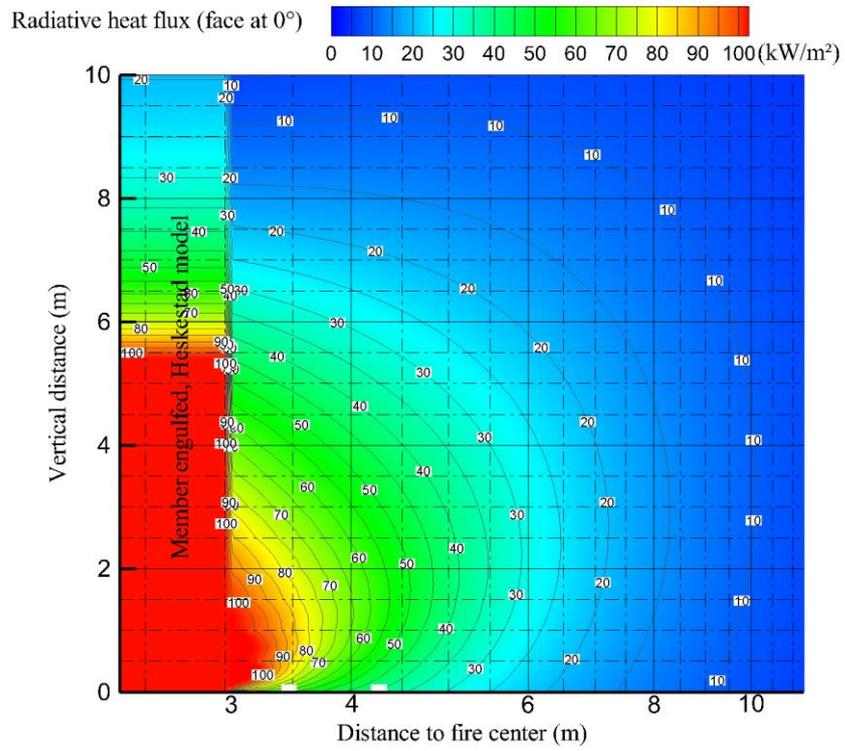


Figura C.15 Nomograma para  $D = 6 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

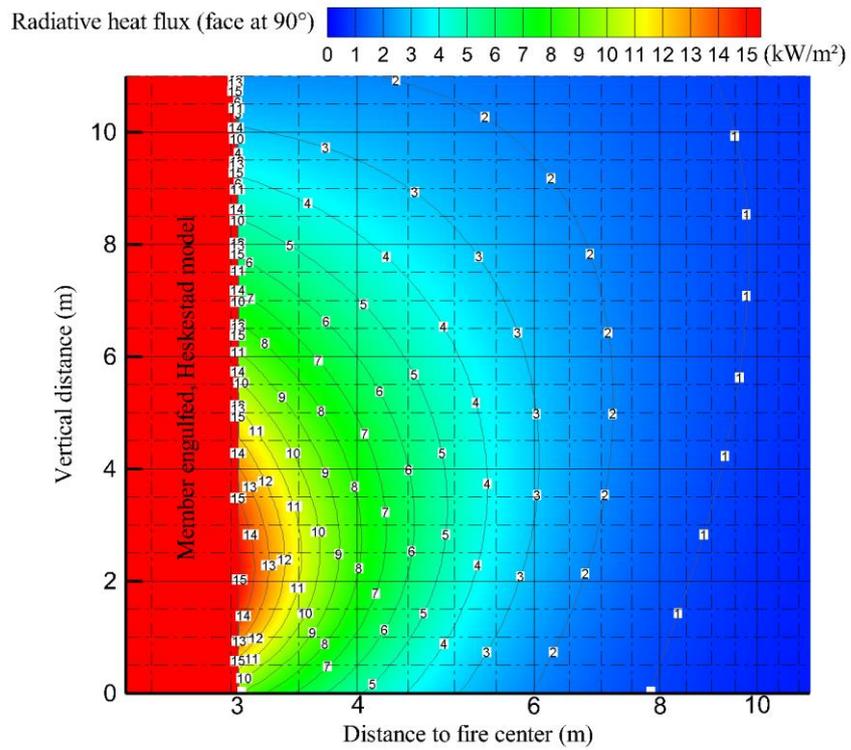
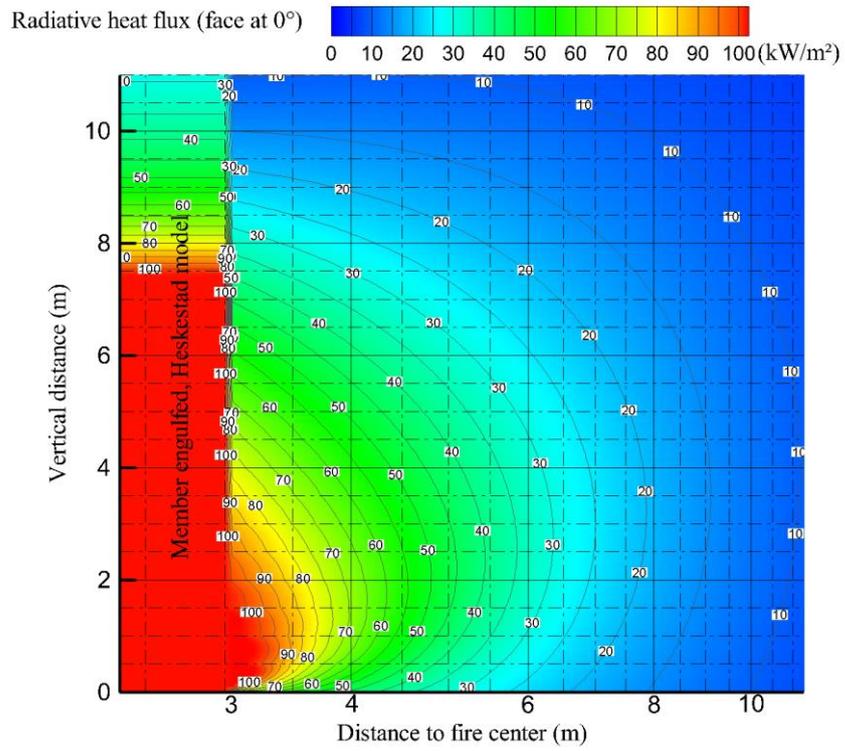


Figura C.16 Nomograma para  $D = 6 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1500 \text{ kW/m}^2$

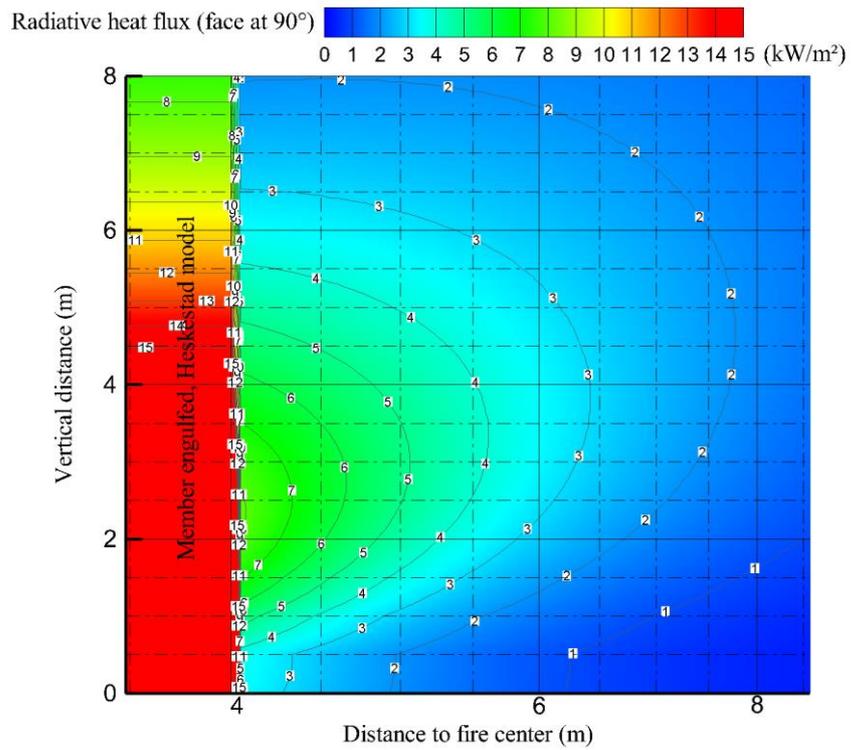
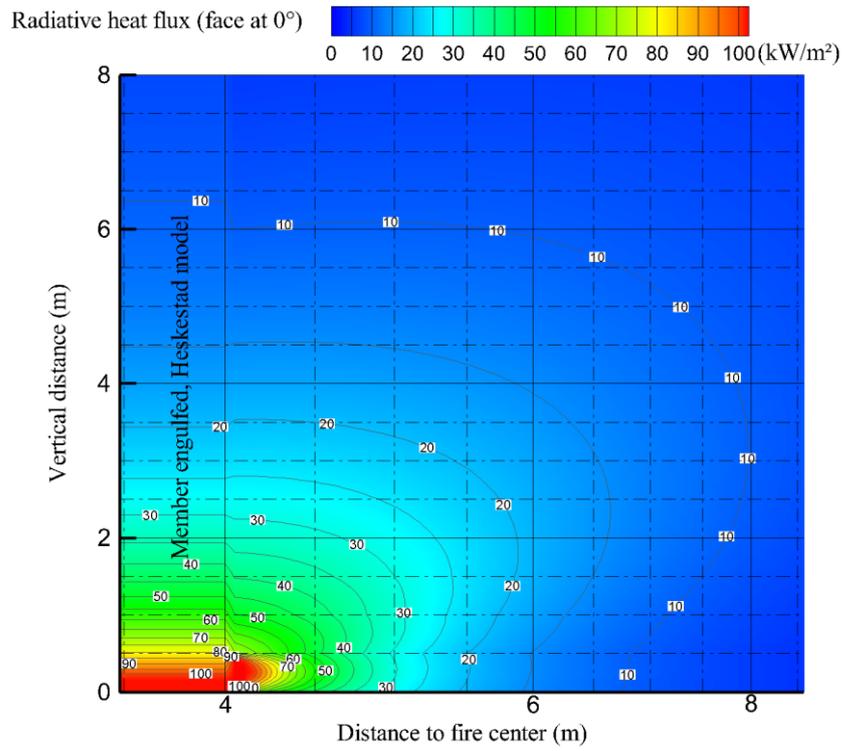


Figura C.17 Nomograma para  $D = 8 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

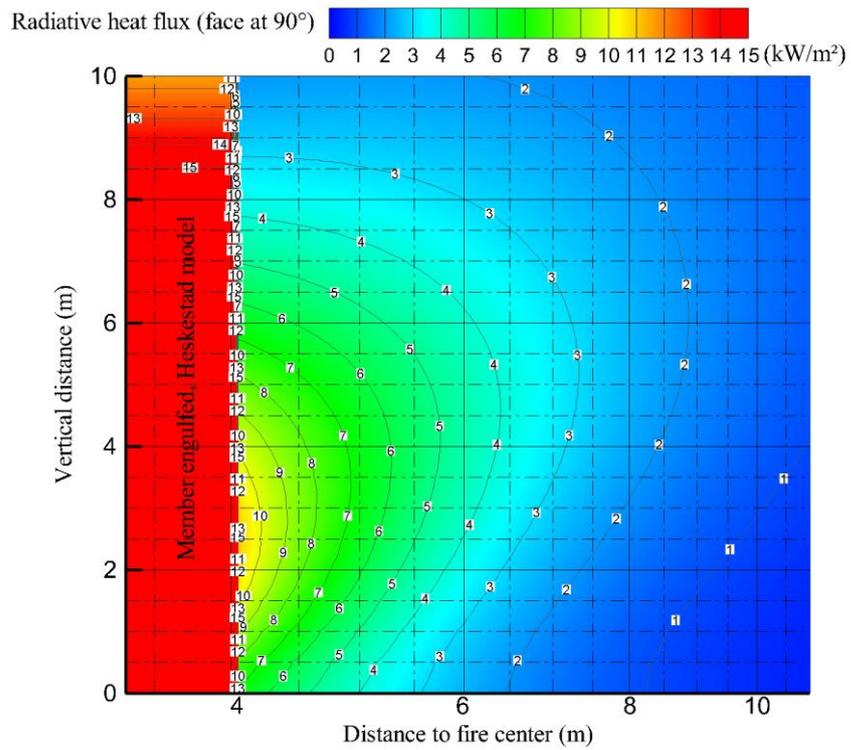
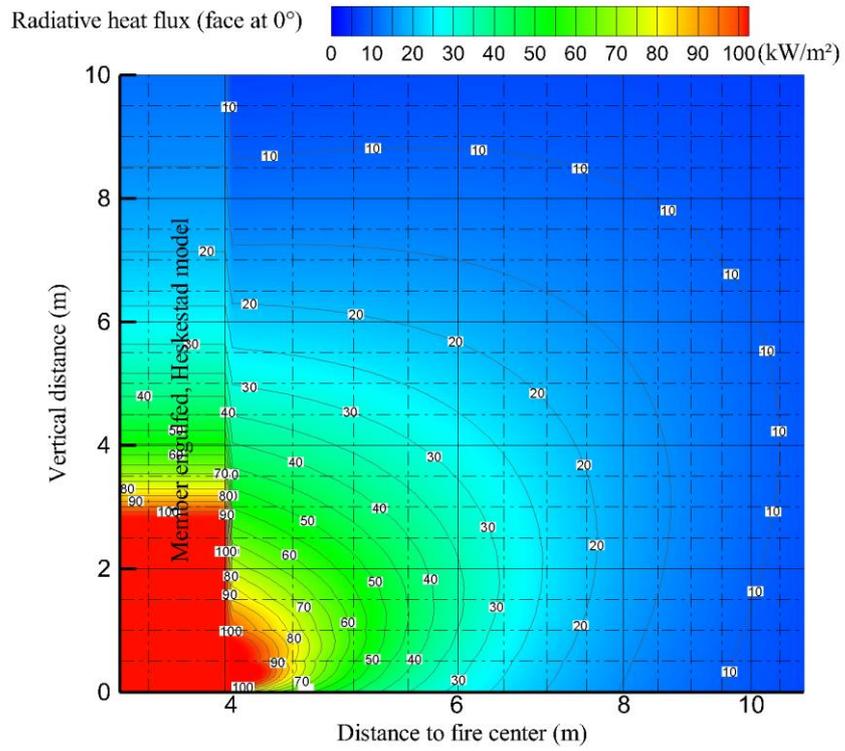


Figura C.18 Nomograma para  $D = 8 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

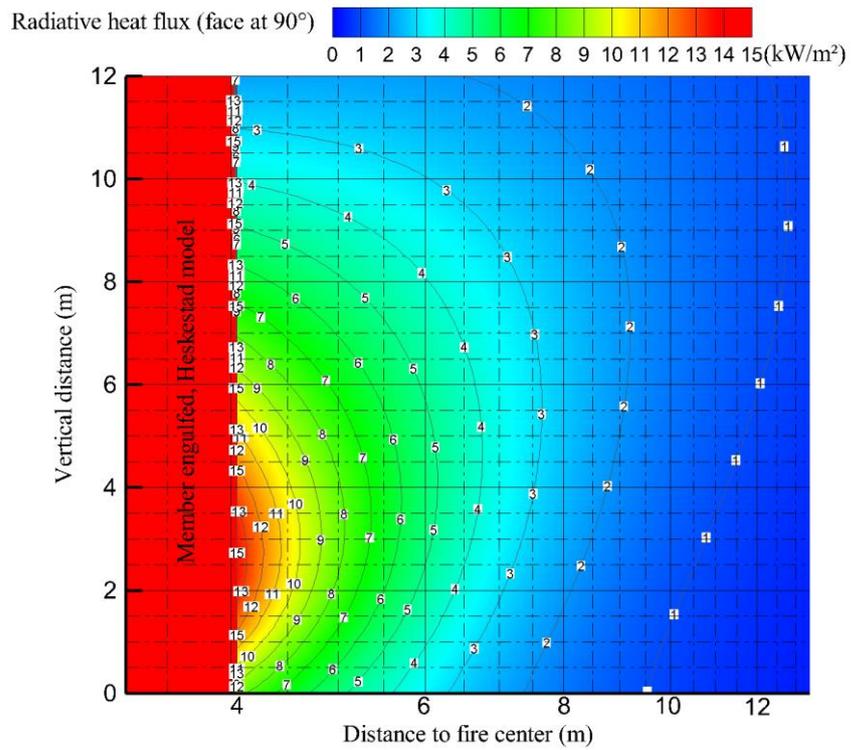
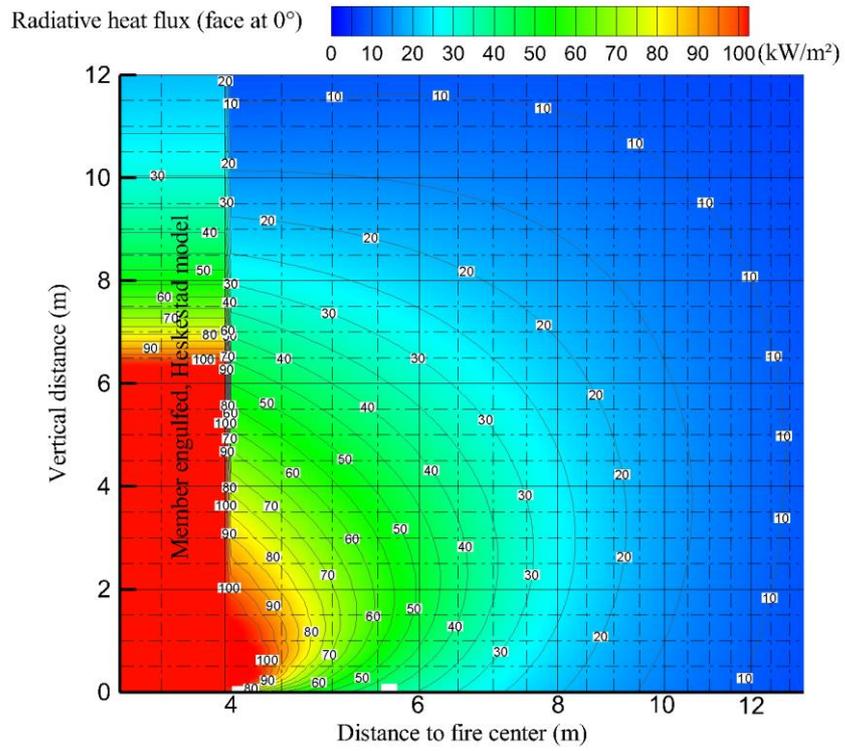


Figura C.19 Nomograma para  $D = 8 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$

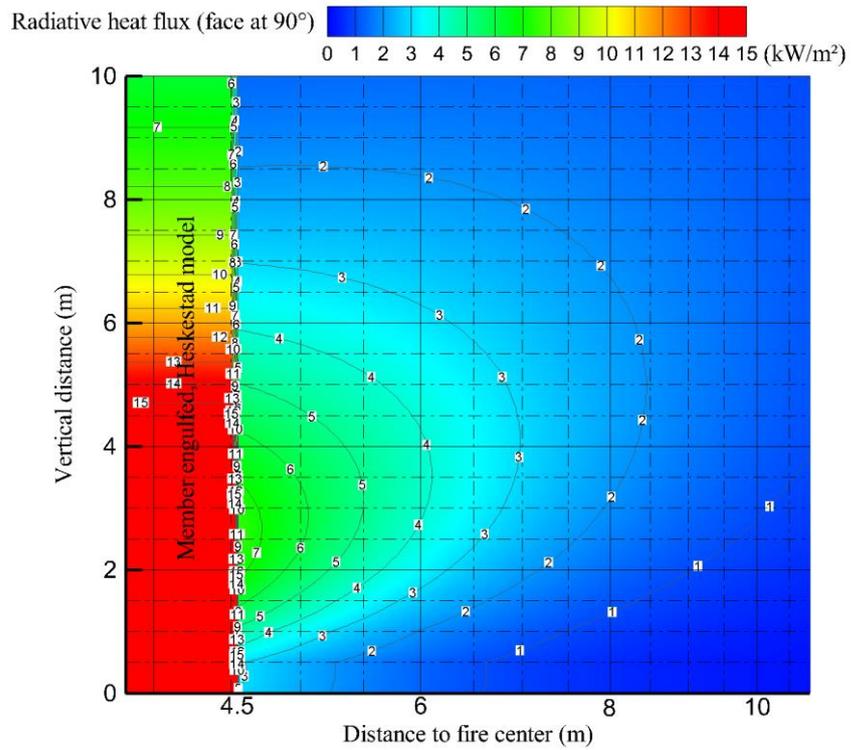
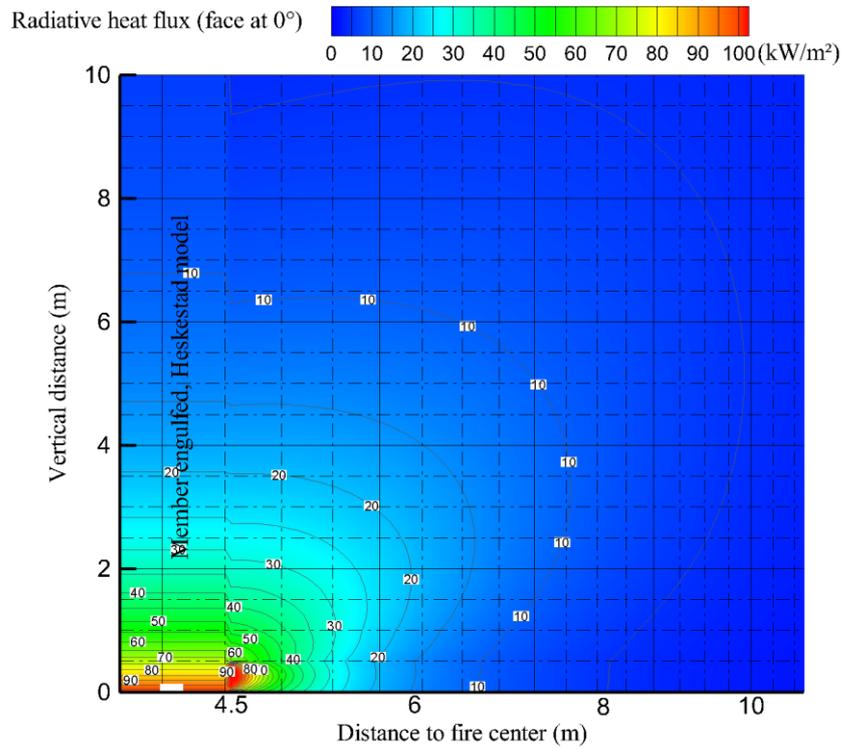


Figura C.20 Nomograma para  $D = 9 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

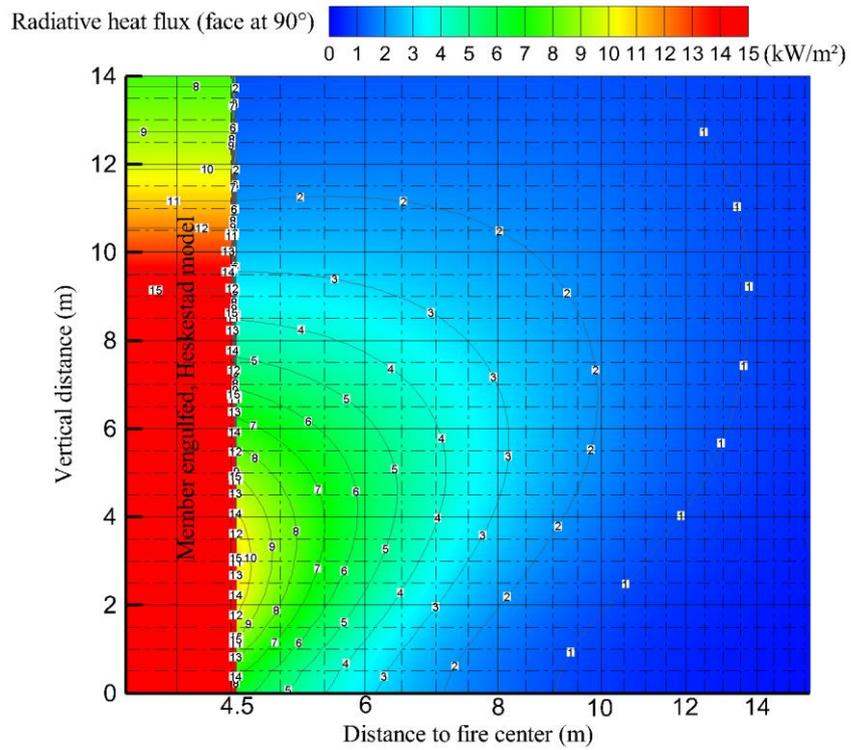
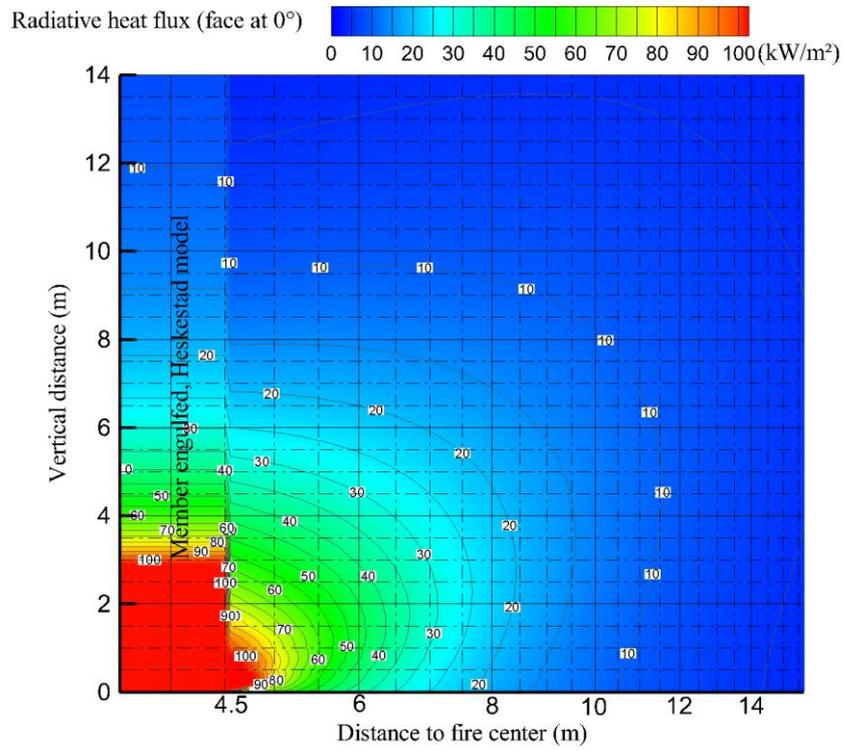


Figura C.21 Nomograma para  $D = 9 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$

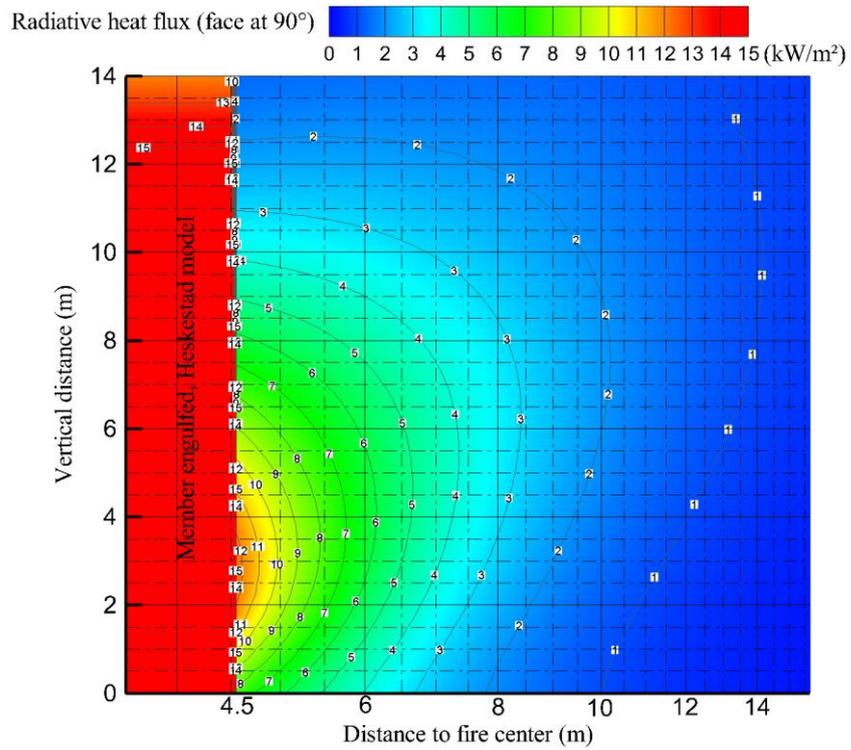
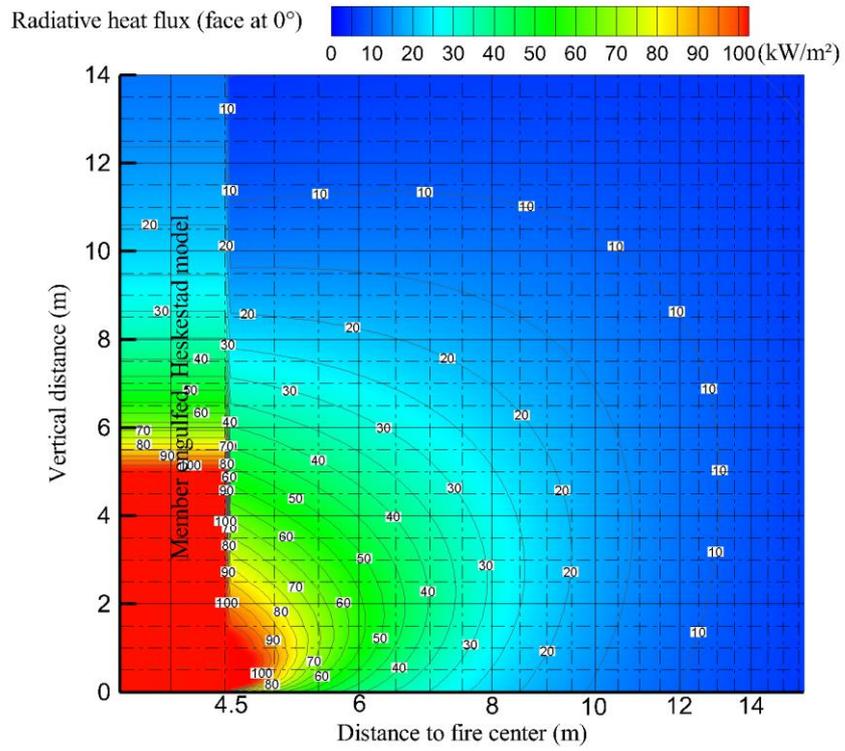


Figura C.22 Nomograma para  $D = 9 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 750 \text{ kW/m}^2$

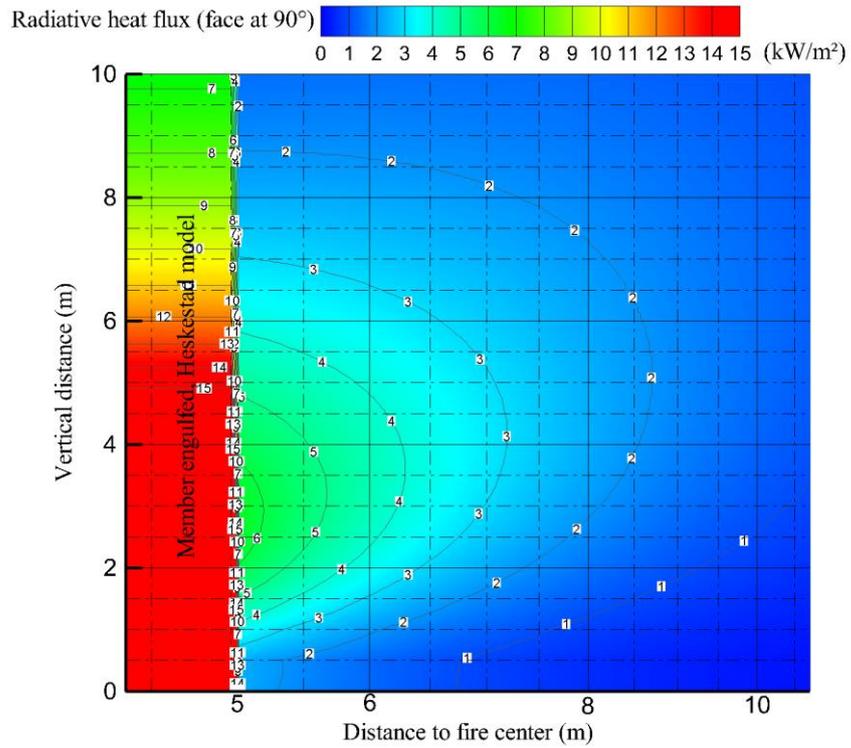
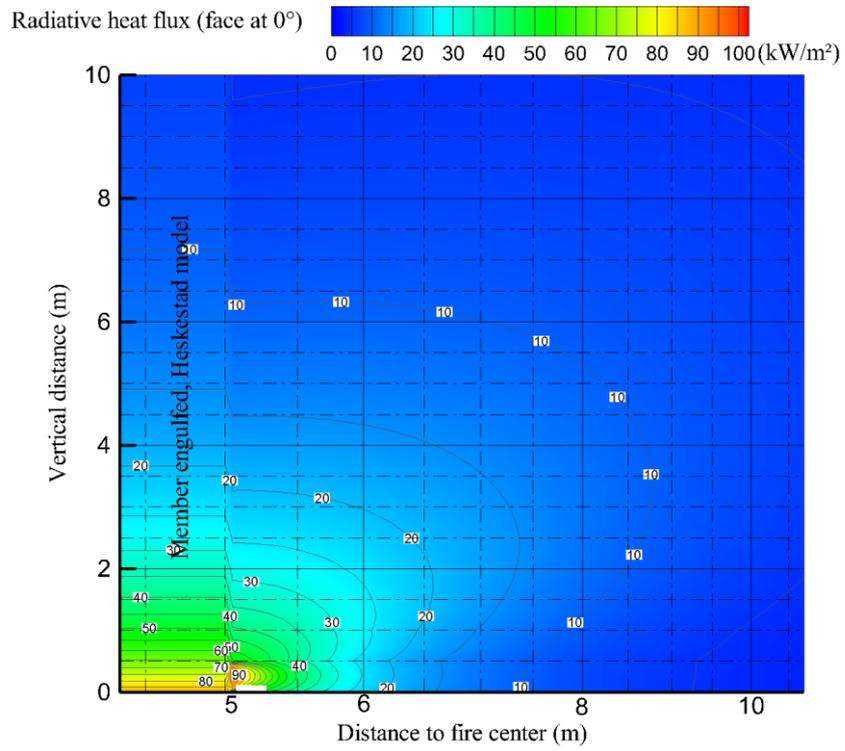


Figura C.23 Nomograma para  $D = 10 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 250 \text{ kW/m}^2$

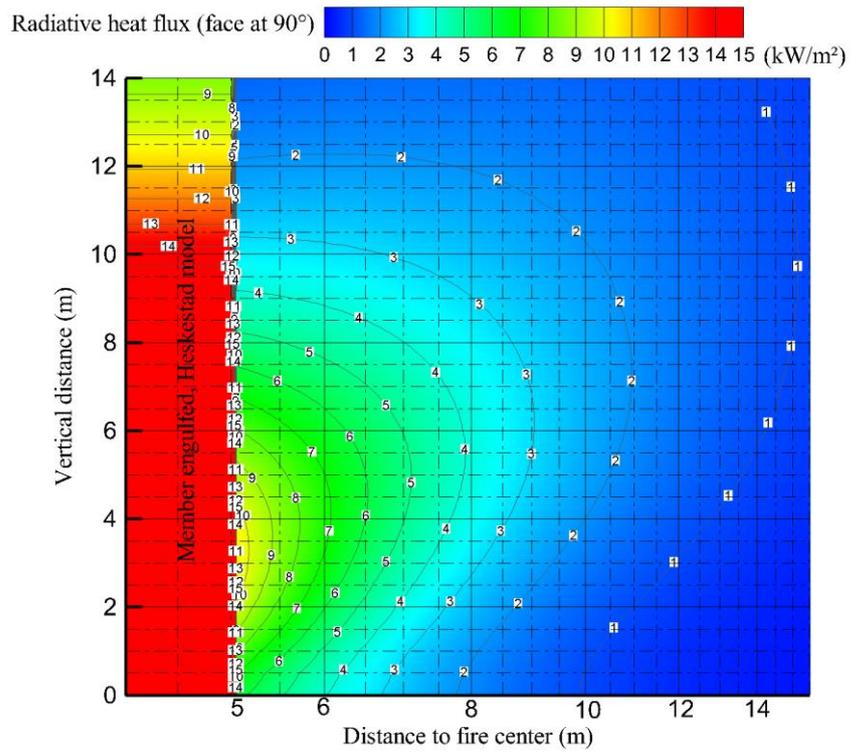
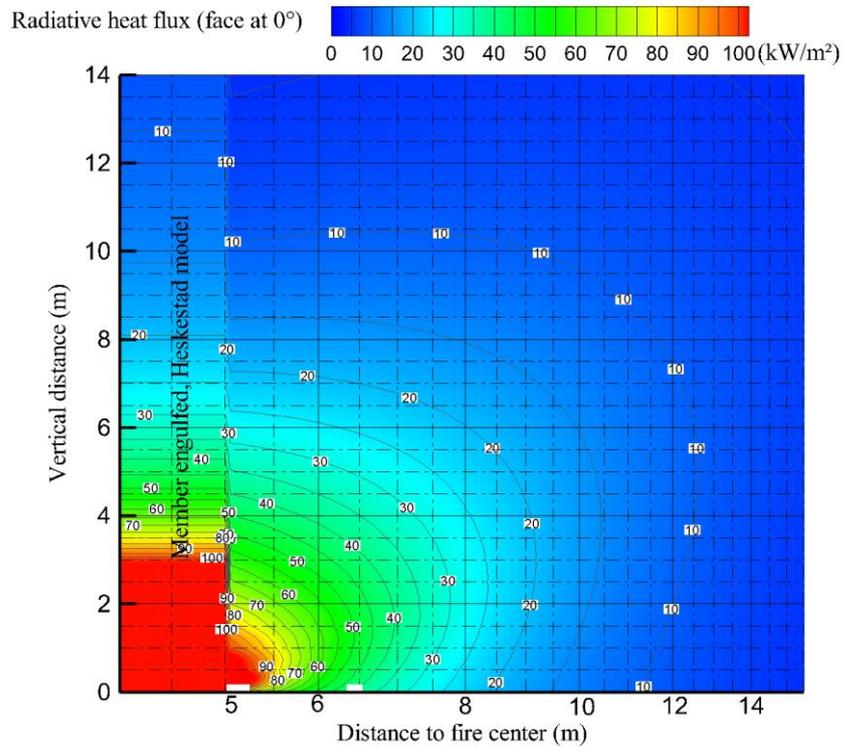


Figura C.24 Nomograma para  $D = 10 \text{ m}$  e  $\text{HRR} = 500 \text{ kW/m}^2$



## ANEXO D EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Os exemplos de cálculo deste anexo demonstram a aplicação dos métodos descritos na Secção 4 para determinar a temperatura de uma coluna sujeita a um cenário de incêndio localizado.

O primeiro exemplo é uma extensão direta do método para colunas na camada de fumo fora do fogo (zona 4). O segundo exemplo foca-se na aplicação do novo modelo (zona 1) utilizando nomogramas e o programa de cálculo OZone. O terceiro exemplo é um caso complexo envolvendo 4 incêndios localizados e uma curva HRR não convencional.

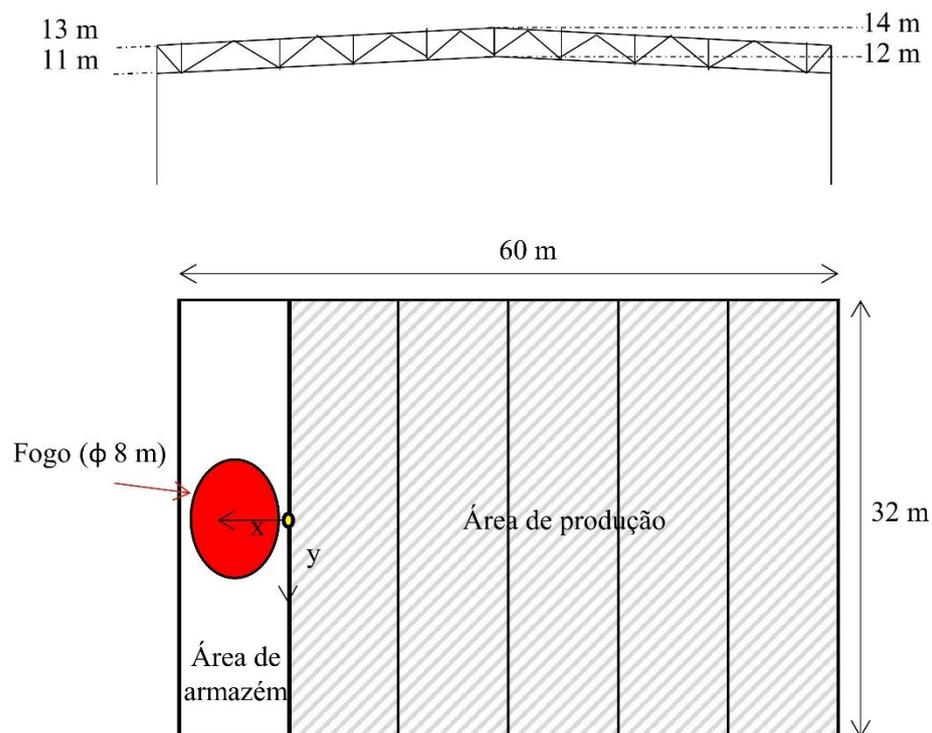
### D.1 Edifício industrial

#### D.1.1 Cenário de incêndio de cálculo

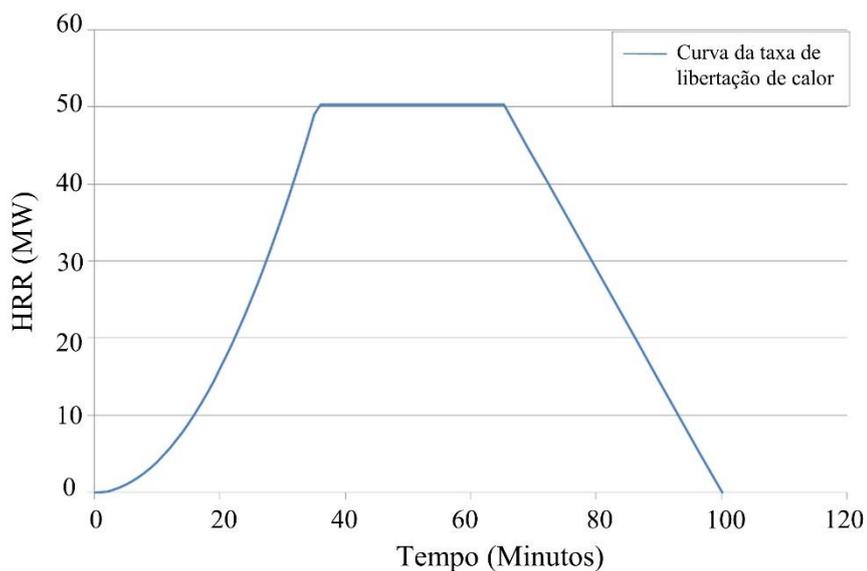
Um armazém com 60 m de comprimento e 32 m de largura com o cume à altura de 14 m como representado na Figura D.1. Em termos de estrutura, os pórticos de aço estão espaçados de 10 m e os banzos das treliças são perfis HEA 220 e as diagonais são cantoneiras duplas encostadas pelas abas (L60×60×6).

A área do piso do edifício é maioritariamente utilizada para produção, mas existe uma pequena área de armazém entre dois pórticos nas traseiras do edifício. O incêndio localizado terá início nessa área. Estão armazenadas 10 toneladas de material celuloso numa área de 50 m<sup>2</sup> (equivalente a um diâmetro de incêndio de 8 m), longe de qualquer outro material combustível. A curva HRR (Figura D.2) é baseada no método do Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010, considerando os seguintes pressupostos:

- a) A velocidade de propagação do incêndio é média ( $t_{\alpha} = 300$  s).
- b) O material combustível é de origem celulósica e liberta 17.5 MJ/kg.
- c) A HRR por unidade de área é 1000 kW/m<sup>2</sup>.



**Figura D.1** Descrição do edifício industrial



**Figura D.2** HRR para o incêndio localizado no edifício

### D.1.2 Introdução dos dados no OZone

A transferência de calor foca-se nas treliças localizadas no interior do fumo, onde os elementos estão mais perto do fogo. Esta posição corresponde ao meio do pórtico a 12 m de altura para o banzo inferior e 14 m de altura para o banzo superior. Os dados de entrada deduzem-se dos parágrafos anteriores e são introduzidos no separador “Incêndio” e no separador “Perfil de Aço” como indicado na Figura D.3 e na Figura D.4.

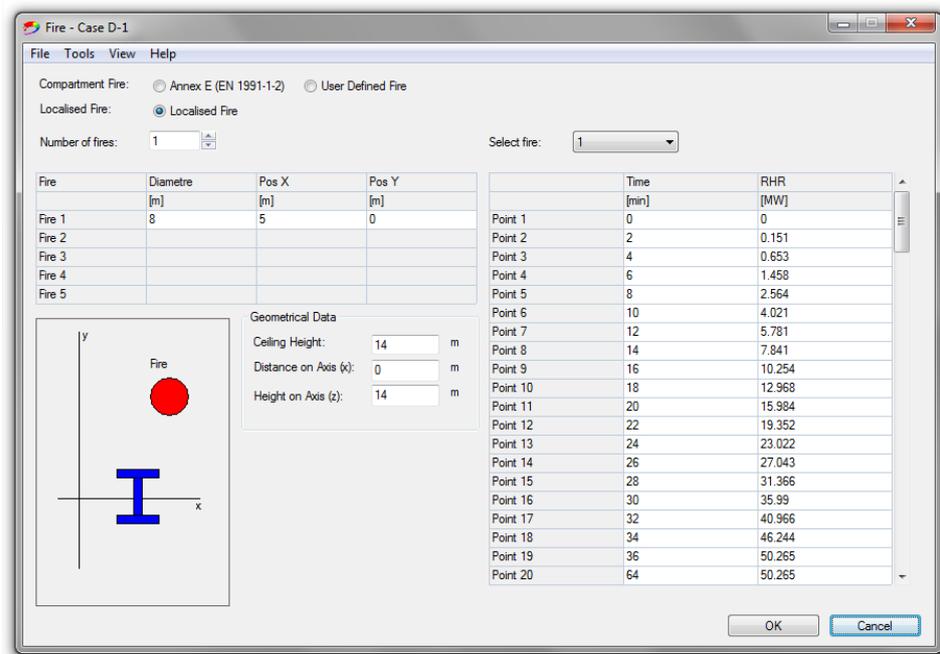


Figura D.3 Introdução dos dados no separador “Incêndio”

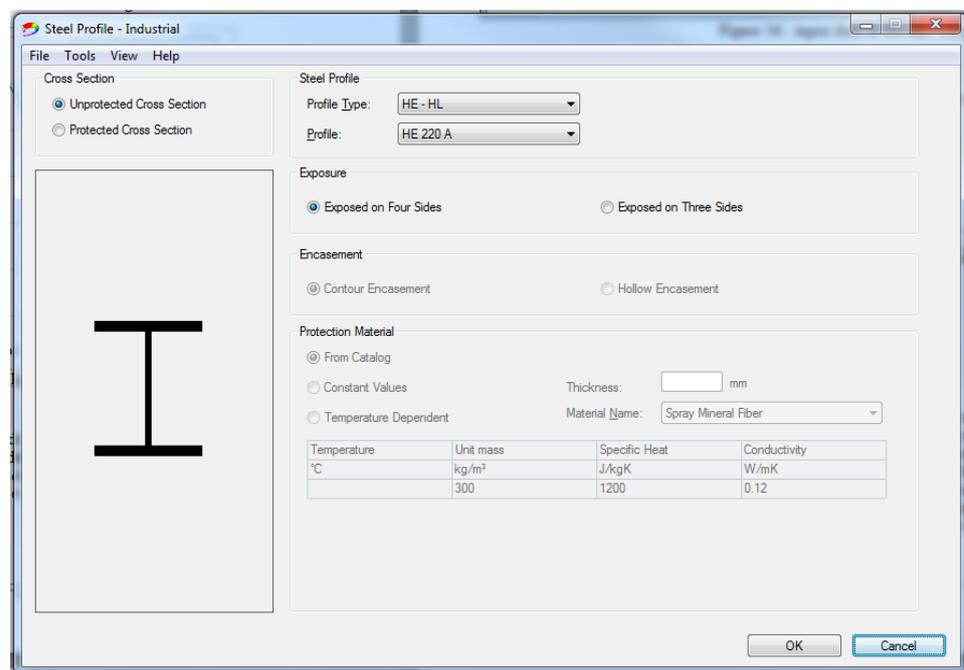
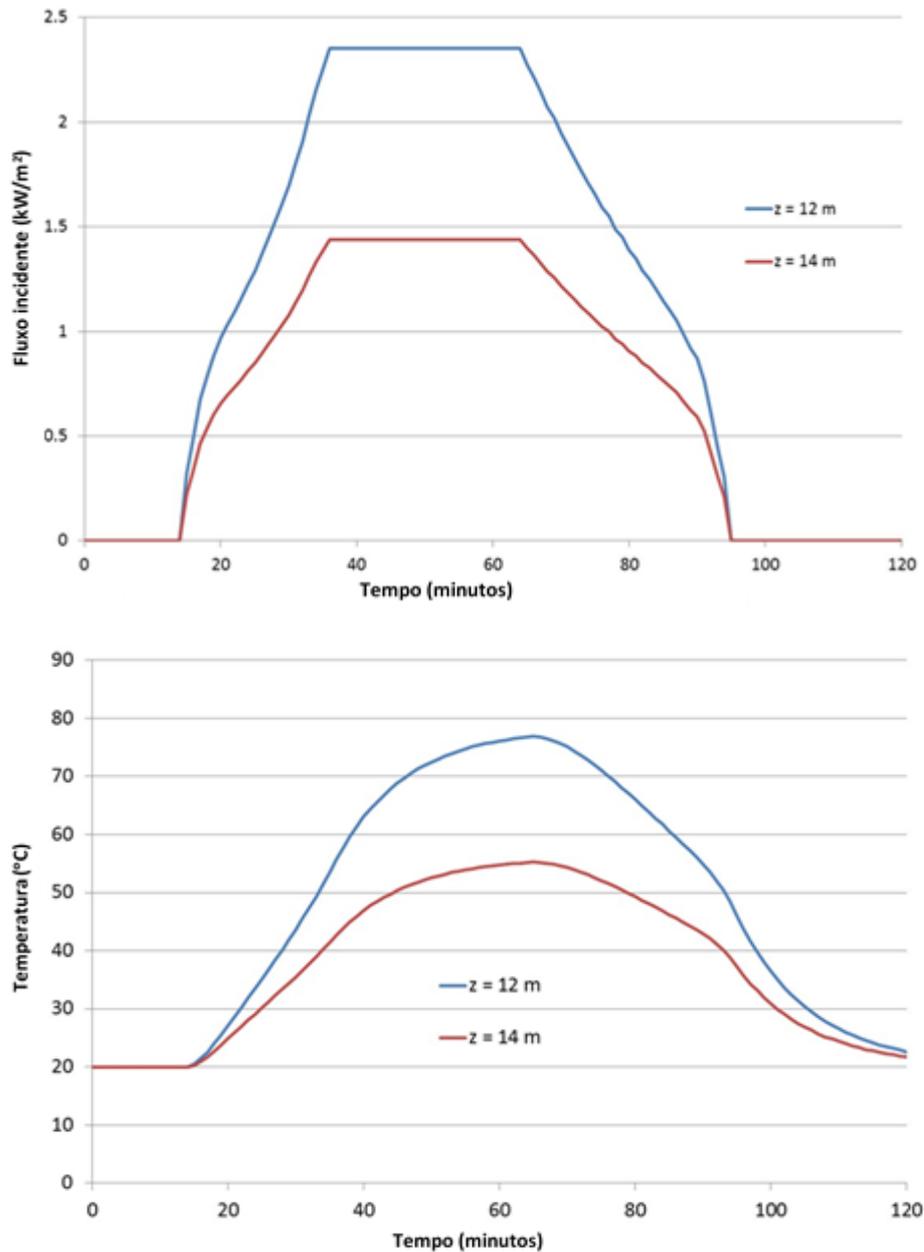


Figura D.4 Introdução de dados no separador “Perfil de Aço”

### D.1.3 Resultados do OZone

Com uma fonte de incêndio de 8 m de diâmetro e uma HRR máxima de 50 MW, a altura da chama é 9.7 m. Como o edifício é mais alto que a chama, as chamas não atingem o teto. O efeito do incêndio é limitado em termos das ações térmicas; a temperatura das treliças na posição calculada situa-se entre 70°C e 80°C (Figura D.5).

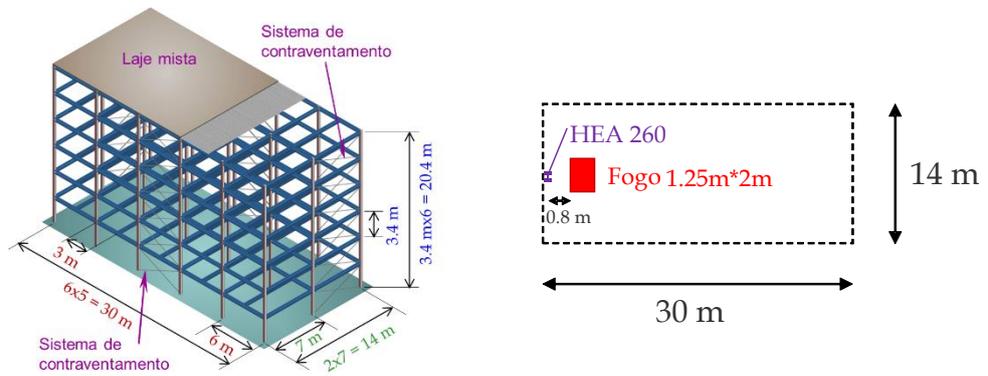


**Figura D.5 Fluxo de calor por radiação recebido (em cima) e temperatura (em baixo)**

## D.2 Edifício de escritórios

### D.2.1 Cenário de incêndio de cálculo

O edifício de escritórios deste exemplo é um edifício de 5 pisos (ver Figura D.6). As suas dimensões são 30 m x 14 m e a altura de cada piso é de 3.5 m; as colunas são perfis de aço HEA260 colocados no perímetro do edifício. O cenário de incêndio baseia-se na ignição de 500 kg de papel para impressão aqui considerado com um poder calorífico de 16.5 MJ/kg e que é armazenado numa área de 2.5 m<sup>2</sup> (2 m x 1.25 m). Em termos de localização, está colocado em frente a uma coluna a 0.8 do banzo como indicado na Figura D.6.

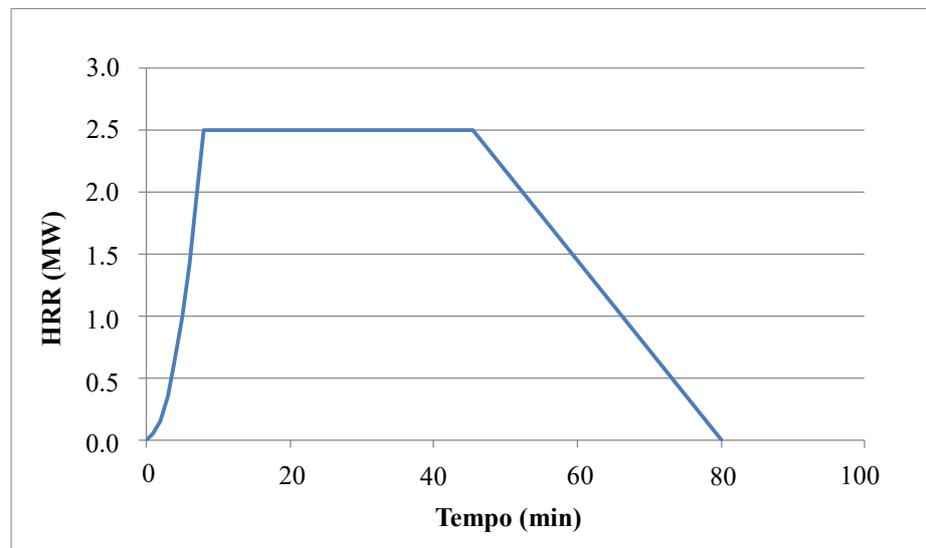


**Figura D.6** Dimensões do edifício de escritórios (esquerda) e posição da fonte de incêndio (direita)

A curva HRR é construída seguindo as recomendações do Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010. A curva tem 3 fases distintas: crescimento, constante e arrefecimento (Figura D.7). A fase de crescimento é definida pela expressão:

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

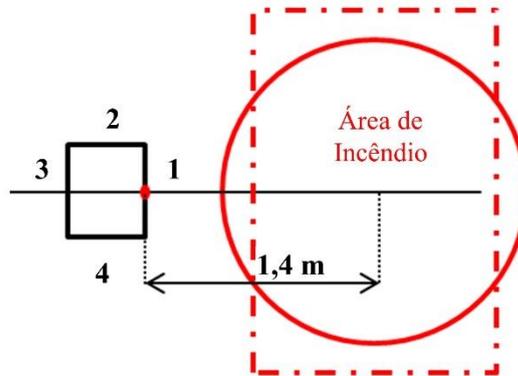
Onde  $Q$  é a HRR,  $t$  é o tempo em segundos e  $t_\alpha$  é o tempo necessário para alcançar uma HRR de 1 MW. Para um edifício de escritórios  $t_\alpha$  é igual a 300 s. Para um incêndio localizado, a HRR não é limitada pela ventilação, mas pela área de incêndio. Assumindo que a HRR = 1000 kW/m<sup>2</sup>, conduz a um máximo de HRR de 2.5 MW. A fase de arrefecimento começa quando 70% da carga de incêndio tiver ardido e acaba quando 100% for consumida.



**Figura D.7** HRR de acordo com o Anexo E da NP EN 1991-1-2:2010

## D.2.2 Utilização de nomogramas

De acordo com a Secção 4.2.1 a área de incêndio é convertida numa área circular equivalente. O seu diâmetro é 1.8 m para uma área de 2.5 m<sup>2</sup> (Figura D.8). O maior lado da coluna mede 260 mm e está a 1.4 m do centro do fogo.



**Figura D.8 Configuração adaptada**

A máxima HRR é 1000 kW/m<sup>2</sup> correspondendo a um valor disponibilizado na lista de nomogramas. Para o diâmetro, é selecionado um valor superior de 2 m. Os valores são lidos na Figura C.3

A coluna é dividida em segmentos de 0.5 m. Os fluxos de calor médio para cada segmento são calculados utilizando a Equação (4.2). Esses valores são apresentados na Tabela D.1. Note-se que os valores na camada superior de gases quentes (acima de 3.15 m de altura) não são disponibilizados.

**Table D.1 Fluxos de calor**

Altura (m)	Fluxo de calor		
	Face 1	Face 2	Média
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

Na zona 1, o fluxo de calor por radiação mais elevado é a 0.5 m e tem o valor de 19.75 kW/m<sup>2</sup>. Utilizando a Figura 4.9, a temperatura de equilíbrio é estabelecida como 300°C.

## D.2.3 Utilização do OZone

### D.2.3.1 Introdução dos dados no OZone

O procedimento para calcular a evolução do fluxo de calor e temperatura da coluna devido ao incêndio localizado com o OZone segue os mesmos passos descritos anteriormente.

Primeiro, deve ser indicada a posição da fonte de incêndio em relação à posição da coluna (supondo estar a X=0 e Y=0), juntamente com a evolução de HRR na janela

‘Incêndio Localizado’: com um espaçamento de 0.5 m e um diâmetro de incêndio de 1.8 m o incêndio (centro) é posicionado a 1.4 m, ver Figura D.9. Na mesma janela, indica-se a altura do compartimento, juntamente com a localização do ponto onde se pretende realizar o cálculo (altura no eixo da coluna entre  $z = 0.5$  m e 3.5). Seguidamente seleciona-se o separador “Perfil de Aço”, e seleciona-se a coluna HE260A.

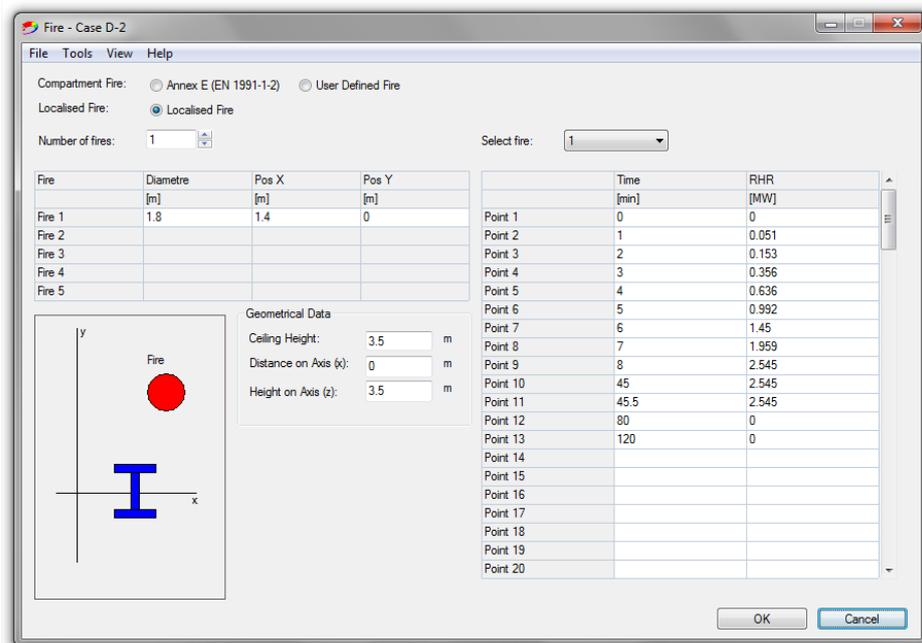


Figura D.9 Introdução dos dados no separador “Incêndio”

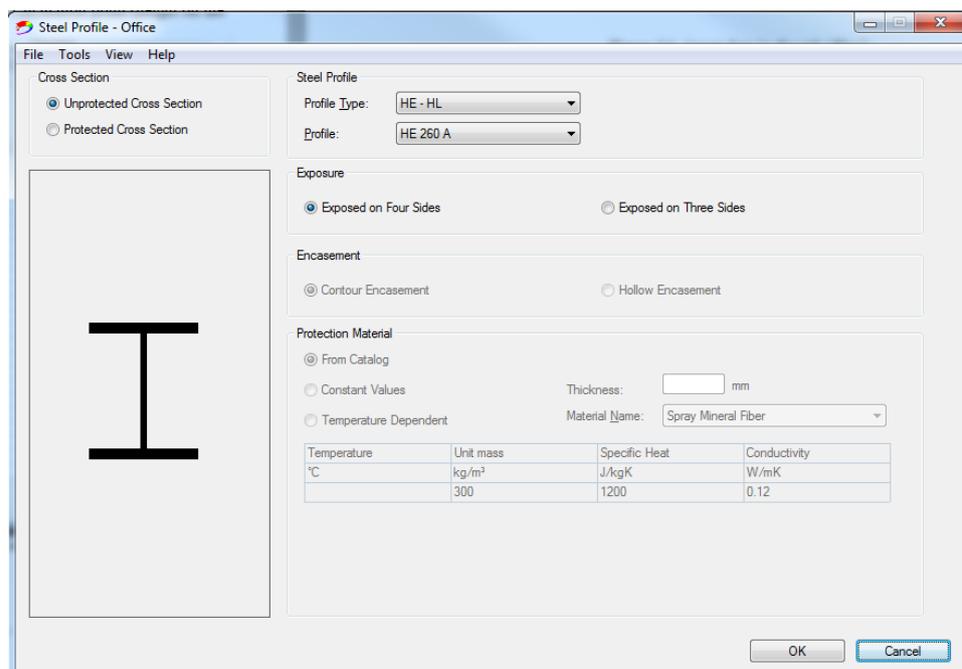


Figura D.10 Introdução dos dados no separador “Perfil de Aço”

### D.2.3.2 Resultados do OZone

Os resultados para a temperatura e fluxos de calor são apresentados na Figura D.11 para segmentos ao longo da coluna de 0.5 m (0.5 m – 1.0 m – 1.5 m – 2.0 m – 2.5 m – 3.0 m – 3.5 m). A temperatura máxima calculada é 262°C a 0.5 m e 1.0 m. Isto implica que deve ser atingido um valor de temperatura ligeiramente superior entre estes dois níveis (evolução em forma de barriga da temperatura devido à forma cónica da chama sólida). Na camada superior de gases quentes, a temperatura atinge 287°C.

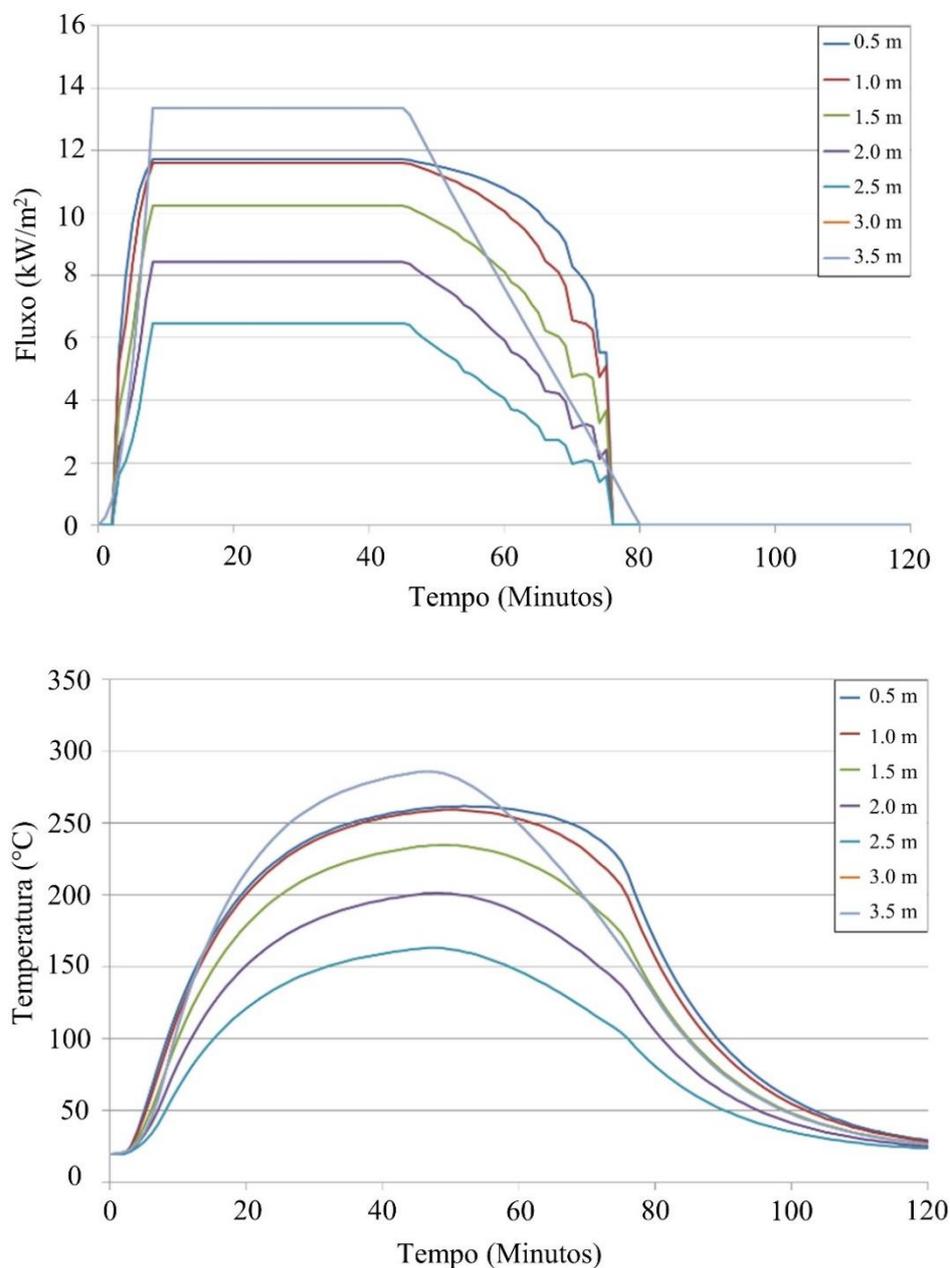


Figura D.11 Fluxo de calor por radiação recebido (em cima) e temperatura (em baixo)

### D.2.4 Verificação da segurança da coluna

Conhecida a temperatura, a coluna pode ser calculada. O edifício utilizado neste exemplo foi retirado de ‘Eurocodes: Background and applications - Structural fire design - Worked examples’, disponibilizado pela Comissão Europeia<sup>[19]</sup>.

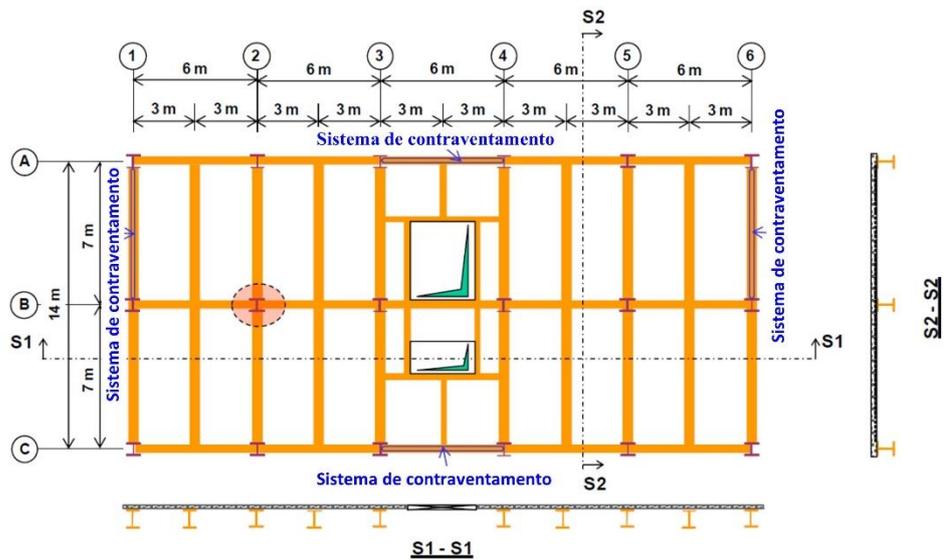


Figura D.12 Localização da coluna

#### D.2.4.1 Carga aplicada

A cada nível do piso, esta coluna recebe cargas concentradas de duas vigas secundárias simplesmente apoiadas e duas vigas principais centrais simplesmente apoiadas. Em situação de incêndio, as cargas aplicadas nas vigas secundárias simplesmente apoiadas são uniformemente distribuídas com um valor de 14.105 kN/m. As cargas aplicadas às vigas principais simplesmente apoiadas são: uma carga concentrada a meio vão com o valor de 202.4 kN e uma carga uniformemente distribuída com o valor de 1.12 kN/m. Além disso, a carga concentrada aplicada a esta coluna inclui as reações de suporte das duas vigas secundárias acima e da viga principal. Para além das cargas mencionadas acima, deve ser considerado o peso próprio da coluna tendo o valor de 1.15 kN/m.



Figura D.13 Carregamento para a coluna do piso térreo

Portanto, a carga aplicada a esta coluna pode ser calculada da seguinte forma:  
A cada nível, a carga concentrada proveniente da viga é:

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

Nota: Dependendo do país, deve ser aplicado  $\psi_{1,1}$  ou  $\psi_{2,1}$ .

O peso próprio da coluna por nível (com a mesma secção transversal em toda a altura do edifício) é:

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

Assim, a carga axial total aplicada a esta coluna é:

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

#### D.2.4.2 Classificação da secção transversal da coluna

A classificação desta coluna pode ser obtida através da combinação da Tabela 5.2 da NP EN 1993-1-1:2010 e da cláusula 4.2 da NP EN 1993-1-2:2010 para uma secção transversal totalmente comprimida.

As dimensões da secção transversal HEB300 da coluna são resumidas na Figura D.14.

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

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

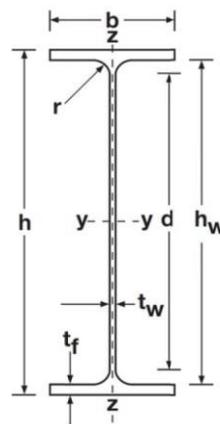
$$t_w = 11 \text{ mm}$$

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

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

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

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



**Figura D.14** Dimensões e notação de um perfil de aço com forma I ou H

De acordo com a cláusula 4.2 da NP EN 1993-1-2:2010:

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{235/f_y} = 0.786 \text{ com a classe do aço S275} \quad (\text{D.5})$$

De acordo com a Tabela 5.2 da NP EN 1993-1-1:2010, os critérios para a Classe 1 da alma e do banzo são:

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

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

Com estas dimensões:

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

Assim a coluna é classificada como Classe 1.

### D.2.4.3 Cálculo da resistência utilizando o modelo de resistência LOCAFI

Com base na temperatura e nas propriedades da secção transversal, pode-se estabelecer a resistência da coluna.

Para evitar, neste documento, o cálculo da temperatura no pilar em questão, considerar-se-á uma temperatura de cálculo de 275°C, igual à temperatura obtida pelo OZone para a coluna de fachada HEA260, como representado na Figura D.11. Os fatores de redução do material podem ser obtidos através da Tabela 3.1 da NP EN 1993-1-2:2010:

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

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

A área da secção transversal do perfil é:

$$A = 14910 \text{ mm}^2 \tag{D.7}$$

O momento de inércia em relação ao eixo fraco vale:

$$I_z = 85630000 \text{ mm}^4 \tag{D.8}$$

O comprimento de encurvadura em situação de incêndio é 0.7 da altura do armazém, como representado na Figura 5.2.

$$L_{cr} = 0.7 \times 3.4 \times 10^3 = 2380 \text{ mm} \tag{D.9}$$

A carga crítica de Euler vale:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{3.14^2 \times 210000 \times 8.563 \times 10^7}{2380^2} = 31332213 \text{ N} \tag{D.10}$$

A esbelteza normalizada à temperatura normal é então calculada como indicado seguidamente:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{14910 \times 275}{31332213}} = 0.362 \quad (\text{D.11})$$

A esbelteza a elevada temperatura vale:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.361 \sqrt{\frac{1.0}{0.825}} = 0.399 \quad (\text{D.12})$$

O coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão da coluna a temperatura elevada pode ser calculado utilizando as três equações seguintes:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.60 \quad (\text{D.13})$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} (1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2) = \frac{1}{2} (1 + 0.6 \times 0.399 + 0.399^2) = 0.699 \quad (\text{D.14})$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0.699 + \sqrt{0.699^2 - 0.399^2}} = 0.786 \quad (\text{D.15})$$

A resistência a elevadas temperaturas pode ser calculada como:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.786 \times \frac{14910}{1000} \times 1.0 \times \frac{275}{1.0} = 3223 \text{ kN} \quad (\text{D.16})$$

#### D.2.4.4 Comparar a resistência com a carga aplicada

O passo final de cálculo é comparar a resistência a elevada temperatura com a carga aplicada:

$$1871 \text{ kN} < 3223 \text{ kN} \Rightarrow N_{fi,d,t} < N_{b,fi,t,Rd} \quad \text{ok!} \quad (\text{D.17})$$

O cálculo mostra que a coluna tem uma resistência adequada para o cenário de incêndio em causa.

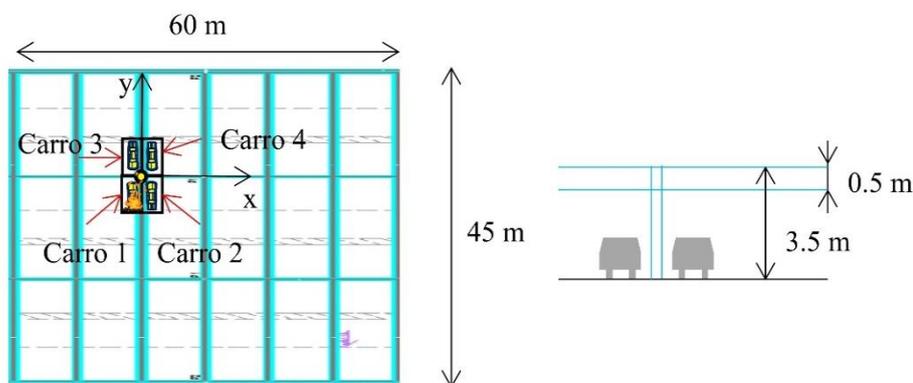
## D.3 Parque de estacionamento aberto

### D.3.1 Cenário de incêndio de cálculo

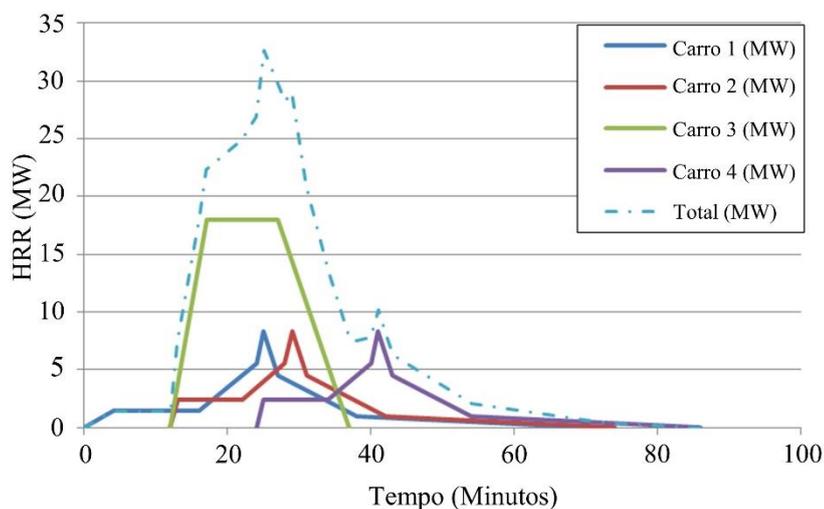
O projeto considera um parque de estacionamento aberto, com um comprimento de 60 m, uma largura de 45 m e uma estrutura em grelha ortogonal de 10 m × 15 m. A altura do teto em cada piso é de 3.5 m (ver Figura D.15). As vigas principais têm uma altura de 0.50 m. As colunas do parque de estacionamento são perfis HEA 300. Os lugares de estacionamento têm dimensões padrão de 2.5 m × 5 m; com uma área

de  $12.5 \text{ m}^2$  sendo isto equivalente a um incêndio localizado de 4 m de diâmetro. A localização das vigas controla o alastramento do fumo debaixo do teto.

O cenário de incêndio envolve 4 veículos à volta da coluna. 3 são carros grandes, e o outro é uma carrinha. Esta situação é um dos cenários considerados pelos regulamentos franceses. A HRR correspondente é indicada na Figura D.16. Para os carros grandes, a HRR foi medida durante testes realizados em França em 1996 em Maizières-lès-Metz mas para a carrinha a curva provém de uma análise de risco e é extremamente severa (em termos de carga de incêndio, é equivalente a 1000 kg de madeira a arder). O incêndio começa no carro 1 e alastra-se simultaneamente aos carros 2 e 3 após 12 min. Após mais 12 min, o fogo propaga-se ao carro 4.



**Figura D.15 Parque de estacionamento aberto e localização dos carros**



**Figura D.16 HRR dos veículos**

### D.3.2 Introdução dos dados no OZone

Em termos de introdução de dados, o utilizador deve entrar no separador “Incêndio” e seleccionar “Incêndio Localizado”. A Figura D.17 indica os campos que devem ser preenchidos pelo utilizador:

- O número de fontes de incêndio (4)
- Para cada incêndio a sua posição e curva HRR
- A altura do compartimento (3.5 m)
- A altura da camada superior de gases quentes (0.5 m)
- A altura no eixo da coluna a que o utilizador quer realizar o cálculo.

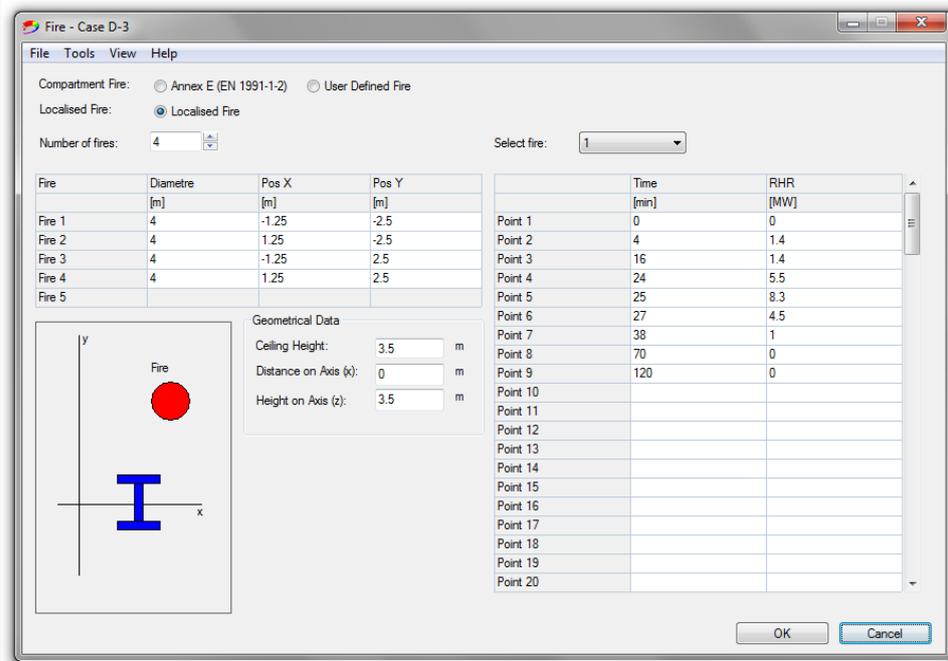


Figura D.17 Introdução dos dados no separador “Incêndio”

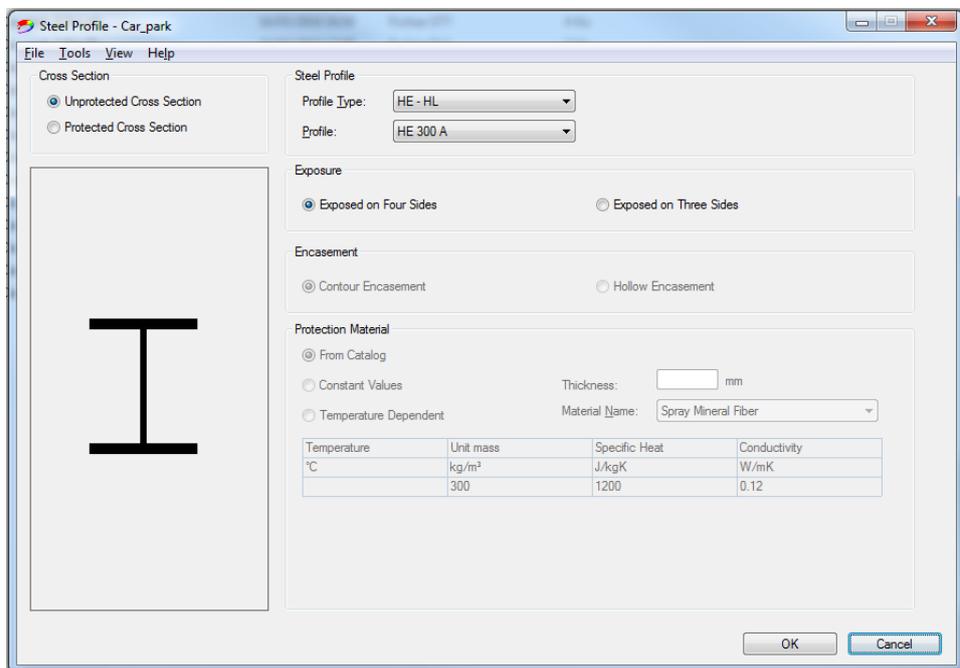
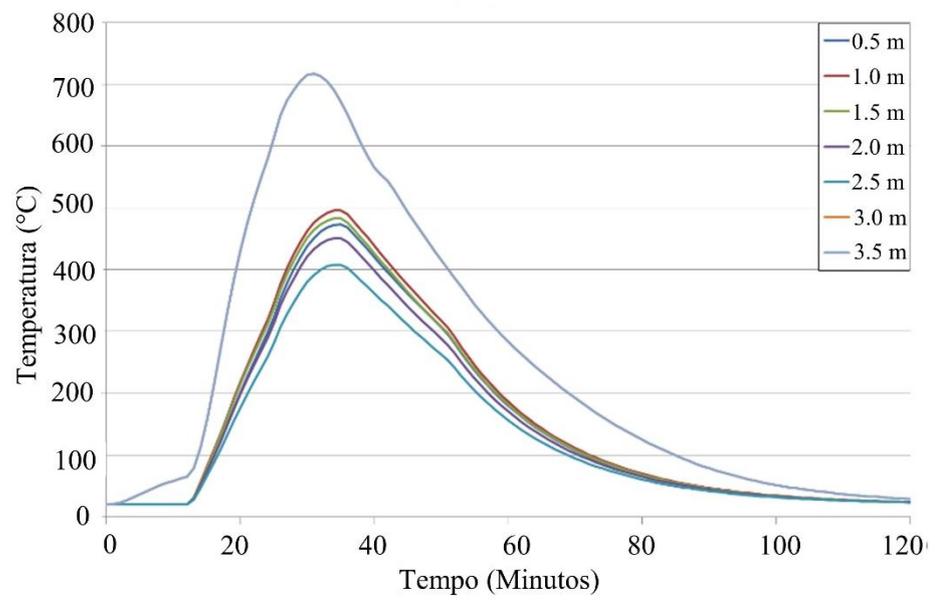
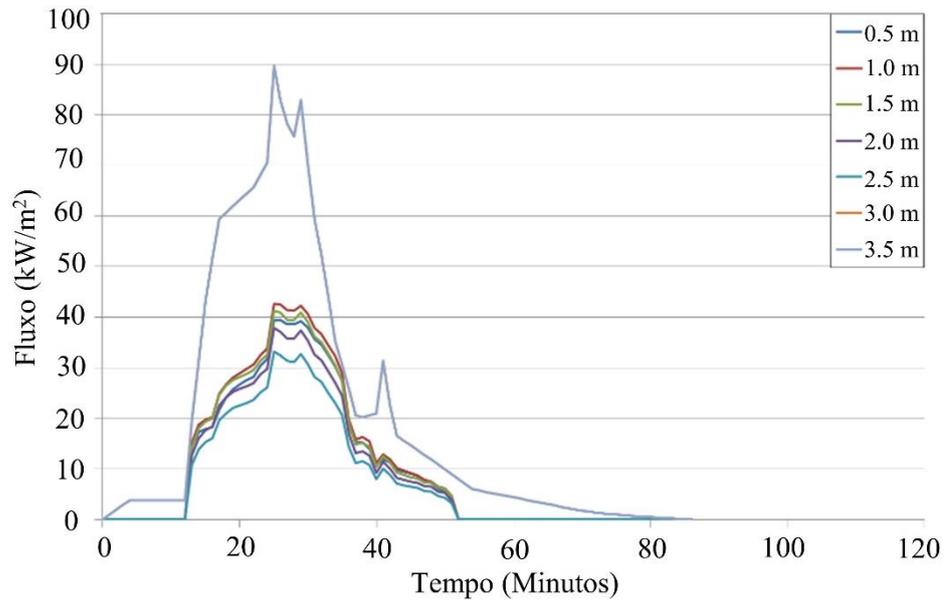


Figura D.18 Introdução dos dados no separador “Perfil de Aço”

Para calcular a temperatura do segmento, o utilizador deve definir a coluna no separador “Perfil de Aço” (ver Figura D.18) e começar o cálculo clicando no botão “Temperatura do Aço”.

O OZone fornece graficamente a temperatura do segmento desejado e os ficheiros de resultados contêm os dados da temperatura e do fluxo recebido. A Figura D.19 apresenta os resultados ao longo da coluna em intervalos de 0.5 m. Fora da camada superior de gases quentes, a temperatura máxima é 500°C a 1 m de altura enquanto que na camada superior de gases quentes (entre 3.0 m e 3.5 m) atinge 718°C.



**Figura D.19 Fluxo de calor por radiação recebido (em cima) e temperatura (em baixo)**





## **DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS SUJEITAS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS**

Este manual de dimensionamento apresenta um método para determinação da temperatura de colunas sujeitas a incêndios localizados em linha com os Eurocódigos Estruturais. Também fornece orientação para o cálculo da resistência de colunas de aço sujeitas a temperaturas elevadas. A utilização desta abordagem baseada no desempenho para avaliar a resistência ao fogo de colunas sujeitas a incêndios localizados, conduz geralmente a uma redução do custo da proteção ao fogo quando comparado com o obtido através de uma abordagem prescritiva.

O manual inclui:

- Uma introdução geral à engenharia de segurança contra incêndios, incluindo a seleção do cenário de incêndio e as técnicas de cálculo.
- Orientação específica para o cálculo de incêndios localizados, incluindo um sumário do trabalho realizado no âmbito do projeto de investigação Europeu LOCAFI.
- Um novo modelo de cálculo para incêndios localizados.
- Uma descrição das ferramentas de cálculo disponíveis para simular incêndios localizados, abrangendo desde análises simplificadas utilizando nomogramas, até modelos sofisticados de elementos finitos.
- Uma descrição do modelo de cálculo da resistência ao fogo de colunas de aço de acordo com o Eurocódigo 3, que pode ser utilizado com o modelo de análise da temperatura aqui apresentado.
- Exemplos de cálculo, demonstrando a utilização do modelo em cenários de cálculo realísticos.