

Programa de Investigação do Fundo de Investigação do Carvão e do Aço

Aço RTD

Projeto realizado com o apoio financeiro do

Programa de Investigação do Carvão e do Aço

WP1 – Preparação dos nomogramas, manual de dimensionamento, apresentações Powerpoint e adaptação do software Ozone

Relatório Técnico N.º:

D1.4

Emitido em **26/03/2018**

Período de Referência:

--

Grupo Técnico:

TGS8 “Produtos em aço e aplicações para edifícios, construção e indústria”

LOCAFI+

Temperature assessment of a vertical steel member subjected to LOCALised Fire – Disseminação

Contrato de subvenção número:

754072 – LOCAFIplus – RFCS-2016

Beneficiários:

ArcelorMittal Belval & Differdange S.A., Luxemburgo

Centre Technique et Industriel de la Construction Métallique, França

Universitatea "Politehnica" Timisoara, Roménia

University of Liège, Bélgica

University of Ulstetr, Reino Unido

Universita Degli Studi di Trento, Itália

Ceske Vysoke Uceni Technicke V Praze, República Checa

Stichting Bouwen Met Staal, Países Baixos

Universidade de Aveiro, Portugal

Bauforumstahl EV, Alemanha

Tallinna Tehnikaulikool, Estónia

Univerza V Ljubljani, Eslovénia

Instytut Techniki Budowlanej, Polónia

Universitat Politecnica de Valencia, Espanha

Technicka Univerzita V Kosiciachsk, Eslováquia

Staalinfocentrum – Infosteel, Bélgica

Miskolci Egyetem, Hungria

Tampere University of Technology, Finlândia

The Steel Construction Insitute LBG, Reino Unido

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB, Suécia

Coordenação

Universitatea "Politehnica" Timisoara, Roménia

Autores e afiliações:

Pintea D. P. U. Timisoara

Zaharia R. P. U. Timisoara

Charlier M. ArcelorMittal

Hanus F. ArcelorMittal

Data de Inicio:

01/07/17

Data de Conclusão:

31/12/18

LISTA DE DISTRIBUIÇÃO

Membros do grupo técnico TGS8:

CM	Dr. Renata OBIALA	ARCELORMITTAL, LUXEMBOURG
	Ms. Nancy BADDOO	THE STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE, UK
	Prof. Primoz MOZE	UNIVERZA V LJUBLJANI, SLOVENIA
	Prof. Luis DA SILVA	UNIVERSIDADE COIMBRA, PORTUGAL
	Prof. Antonio FERNANDES	UNIVERSIDADE DO PORTO, PORTUGAL
	Mr Anthony KARAMANOS	A.S. KARAMANOS & ASSOCIATES, GREECE
	Prof. Andrzej KLIMPEL	SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, POLAND
	Prof. Dr.-Ing. Ulrike KUHLMANN	UNIVERSITÄT STUTTGART, GERMANY
	Dr. Michael LANGER	LANDESBETRIEB STRASSENBAU NORDRHEIN- WESTFALLEN, GERMANY
	Prof. Joaquín ORDIERES MERE	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, SPAIN
	Prof. Walter SALVATORE	UNIVERSITA DI PISA, ITALY
	Dr. Bin ZHAO	CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL DE LA
	Dr. Jose Antonio CHICA	CONSTRUCTION METALLIQUE, FRANCE
	Dr Samir BOUDJABEUR	TECNALIA, SPAIN
	Dr.-Ing. G. DEMOFONTI	TATA STEEL UK LIMITED - SWINDEN
	Dr. S. HÖHLER	TECHNOLOGY CENTRE, UNITED KINGDOM
		CENTRO SVILUPPO MATERIALI SPA, ITALY
		SALZGITTER MANNESMANN FORSCHUNG, GERMANY

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	6
2	BARRA DE MENU	7
3	JANELA PRINCIPAL	10
4	JANELA COMPARTIMENTO.....	12
5	JANELA INCÊNDIO.....	15
5.1	INCÊNDIO EM COMPARTIMENTO – ANEXO E (EN1991-1-2)	15
5.2	INCÊNDIO EM COMPARTIMENTO – INCÊNDIO DEFINIDO PELO UTILIZADOR	17
5.3	INCÊNDIO LOCALIZADO	19
6	JANELA ESTRATÉGIA.....	21
7	JANELA DE PARÂMETROS.....	23
7.1	PARÂMETROS GERAIS.....	23
7.2	MODELO DE ENTRADA DE AR	24
7.2.1	HESKESTAD	24
7.2.2	ZUKOSKI.....	24
7.2.3	MAC CAFFREY.....	24
7.2.4	THOMAS	25
7.3	ABERTURAS DEPENDENTES DA TEMPERATURA E DO TEMPO	25
8	BOTÃO DA AÇÃO TÉRMICA	27
9	JANELA AQUECIMENTO.....	28
10	JANELA DO PERFIL DE AÇO.....	30
11	BOTÃO TEMPERATURA DO AÇO	31
	ANEXO A - FORMULAÇÃO DO MODELO DE ZONA	32
A.1	MODELO DE DUAS ZONAS.....	33
A.2	MODELO DE UMA ZONA.....	35
A.3	INTEGRAÇÃO NO TEMPO.....	35
A.4	MODELO DE DIVISÓRIA	36
A.4.1	FORMULAÇÃO DO MODELO DE DIVISÓRIA	36
A.4.2	INTERAÇÃO DA ZONA COM OS MODELOS DE DIVISÓRIA.....	38
A.5	TROCA DE MODELO DE DUAS ZONAS PARA UMA ZONA.....	40

ANEXO B – TROCAS ATRAVÉS DE ABERTURAS	43
B.1 ABERTURAS VERTICAIS (EM PAREDES)	43
B.1.1 TROCAS CONVECTIVAS.....	43
B.1.2 TROCAS DE RADIAÇÃO	44
B.2 ABERTURAS HORIZONTAIS (NO TETO).....	45
B.3 ABERTURAS FORÇADAS (EXTRATORES DE FUMO)	45
ANEXO C - MODELOS DE COMBUSTÃO	46
C.1 SEM MODELO DE COMBUSTÃO	46
C.2 MODELO DE COMBUSTÃO DE CHAMA EXTERNA	46
C.3 MODELO DE COMBUSTÃO DE DURAÇÃO ALARGADA DO INCÊNDIO	47
ANNEX D – ANEXOS NACIONAIS E PARÂMETROS NACIONAIS PARA APLICAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL EM DIFERENTES PAÍSES EUROPEUS NO PROGRAMA OZONE.....	49
ANEXO E – PROCEDIMENTO DE INCÊNDIO LOCALIZADO	61
ANEXO F – ESTRATÉGIA DE ANÁLISE E CRITÉRIO DE TRANSIÇÃO.....	62
BIBLIOGRAFIA	66

1 INTRODUÇÃO

O OZone é um programa de fácil utilização desenvolvido para calcular a ação térmica provocada por um incêndio e a evolução da temperatura num elemento estrutural de aço, utilizando curvas de incêndio nominais ou modelos de incêndio naturais baseados em parâmetros físicos e químicos. O OZone disponibiliza dois tipos de modelos de incêndio natural: incêndios localizados e incêndios em compartimentos.

Para incêndios em compartimentos, o OZone permite utilizar modelos de uma zona ou duas zonas como definido no Anexo D da EN-1991-1-2. Os modelos de zona são ferramentas numéricas utilizadas para avaliar a evolução da temperatura do gás no interior de um compartimento durante um incêndio. Baseado num limitado número de pressupostos, eles são fáceis de utilizar e fornecem uma boa avaliação da temperatura no compartimento. Desde o primeiro modelo numérico de uma zona desenvolvido por Petersson [SPFE, 1995], tem-se alcançado grandes melhorias no modelo numérico do fogo. Para além disso, têm-se desenvolvido modelos de múltiplas zonas, de múltiplos compartimentos e de dinâmica dos fluidos computacionais. Embora os modelos de zona sejam menos sofisticados, eles têm os seus próprios campos de aplicação e são uma ferramenta essencial nas aplicações de engenharia de segurança contra incêndio.

O principal pressuposto nos modelos de zona é que o compartimento está dividido em zonas em que a distribuição de temperatura é uniforme no tempo. Nos modelos de uma zona, a temperatura é considerada uniforme em todo o interior do compartimento. Este tipo de modelo é válido no caso de incêndios totalmente generalizados no compartimento. Os modelos de duas zonas são mais apropriados quando o incêndio permanece confinado. Nesse caso, os modelos de duas zonas representam melhor a distribuição de temperatura no compartimento: uma camada quente perto do teto e uma camada fria abaixo.

Os modelos de zona implementados no OZone foram desenvolvidos no âmbito das pesquisas ECCS “*Natural Fire Safety Concept*” e “*Natural Fire Safety Concept - Full Scale Tests, Implementation in the Eurocodes and Development of a User Friendly design tool*”. A abordagem probabilística desenvolvida no âmbito da “*Natural Fire Safety Concept*” está incluída na EN 1991-1-2.

O OZone inclui o modelo de uma zona e o modelo de duas zonas com a possibilidade de alternância entre eles se alguns critérios forem inseridos. Também foram desenvolvidos vários modelos de combustão de forma a abranger as diferentes situações.

Em compartimentos grandes onde não ocorre *flashover*, o comportamento da estrutura deve ser analisado segundo condições de incêndio localizado. O procedimento de incêndio localizado implementado no OZone é baseado no trabalho realizado no projeto de investigação RFSR-CT-2012-00023 LOCAFI - *Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localised fire*. No procedimento, as configurações onde as trocas térmicas são provenientes de fluxos convectivos (elementos envolvidos pelo incêndio ou localizados no interior da pluma ao nível do teto) são tratados através da aplicação das equações existentes disponíveis na EN 1991-1-2. Para elementos verticais situados fora do incêndio, as trocas de calor por radiação são calculadas através da representação do incêndio como uma chama sólida virtual. O OZone considera uma forma cônica para a forma da chama virtual sólida. O fluxo é calculado separadamente para as 4 faces do perímetro do contorno do perfil e é aplicado o valor médio do fluxo a todo o perímetro da secção de aço. Isto significa que o efeito de sombra é implicitamente tido em conta.

No OZone é possível definir um incêndio localizado no interior de um compartimento. Nesse caso, para a análise térmica, o utilizador pode obter a temperatura no perfil de aço proveniente da camada superior de gases quentes do compartimento, do incêndio localizado, ou através do máximo entre os dois.

O programa foi validado através de numerosos resultados de testes e análises CFD.

2 BARRA DE MENU

A barra de menu tem os seguintes menus: “Ficheiro”, “Ferramentas”, “Ver” e “Ajuda” (ver Fig. 1).

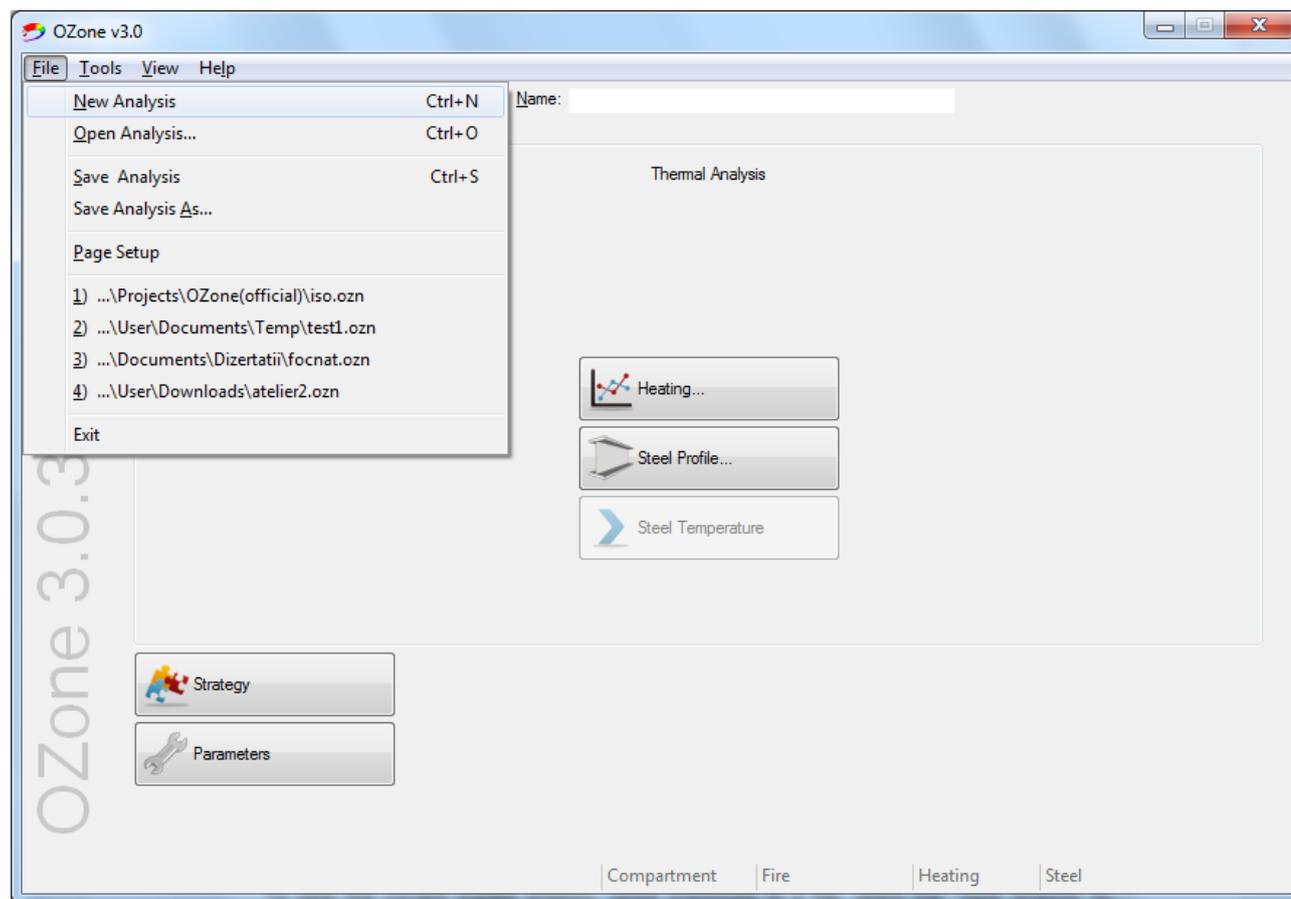


Fig. 1 Janela principal – barra de menu

- Para guardar a análise atual num ficheiro, selecionar o comando “Guardar Análise”, do menu “Ficheiro”. Para guardar a análise aberta atualmente, guardar anteriormente num ficheiro, selecionando o comando “Guardar Análise Como...”, do menu “Ficheiro”.

Os dois comandos abrirão a janela de diálogo “Guardar Como”, em que o utilizador pode selecionar a pasta e o tipo no “Nome do Ficheiro” do ficheiro. O ficheiro de análise será guardado com a extensão *.ozn, e o OZone associar-se-á ele próprio com estes ficheiros (i.e. através de um duplo clique no nome do ficheiro na janela de pesquisa, ou selecionando o comando “Abrir” do menu, o sistema operativo irá lançar o OZone e abrir o ficheiro).

Para começar uma nova análise, selecionar o comando “Nova Análise” do menu “Ficheiro”.

O comando “Configuração da Página” do menu “Ficheiro” abrirá a janela de diálogo comum de configuração de página em que o utilizador pode definir a dimensão da página, orientação e preenchimento das margens.
- No menu “Ferramentas”, o utilizador pode adicionar ou alterar os materiais de confinamento e as suas propriedades térmicas, selecionando o comando “Adicional Material de Parede”.

Para adicionar ou alterar os materiais isolantes do aço, selecionar o comando “Adicionar Material Isolante do Aço”.

Não é possível alterar um material de parede ou um material isolante do aço, a menos que não haja alterações em nenhuma das janelas. Se o OZone avisar: “Há um ficheiro carregado...”, selecione o comando “Nova Análise” do menu “Ficheiro”, e altere os valores em alguma das duas janelas. As alterações aos materiais de parede ou materiais isolantes do aço serão tidas em conta quando o programa for de novo iniciado.

O último comando do menu “Ferramentas” é o comando “Idioma”. Para alterar o idioma da interface do OZone, selecionar “Idioma” no menu “Ferramentas”, e na caixa de diálogo que se abre, selecionar o idioma desejado da lista “Selecionar Idioma”.

- O menu “Ver” contém os comandos de exibição dos dados da análise (RHR, Taxa de Pirólise), e os resultados (RHR Calculada, Taxa de Pirólise Calculada, Temperatura da Camada Superior, etc) em gráficos. Nem todos os comandos do menu “Ver” estão disponíveis, dependendo do estado da análise. Por exemplo, se a temperatura do aço for calculada, o comando “Temperatura do Aço” fica disponível. O último comando do menu “Ver” cria um relatório da atual análise. O relatório será guardado como um documento *Microsoft Word*, na mesma pasta que o arquivo da análise, segundo o nome do ficheiro de análise. Os dados do gráfico podem ser exportados para *excel* utilizando o menu de contexto. Através de um clique com o botão direito em qualquer parte do gráfico e através do menu selecionar “Copiar Gráfico”. Altere para o *excel* e selecione colar (ver Fig. 2).

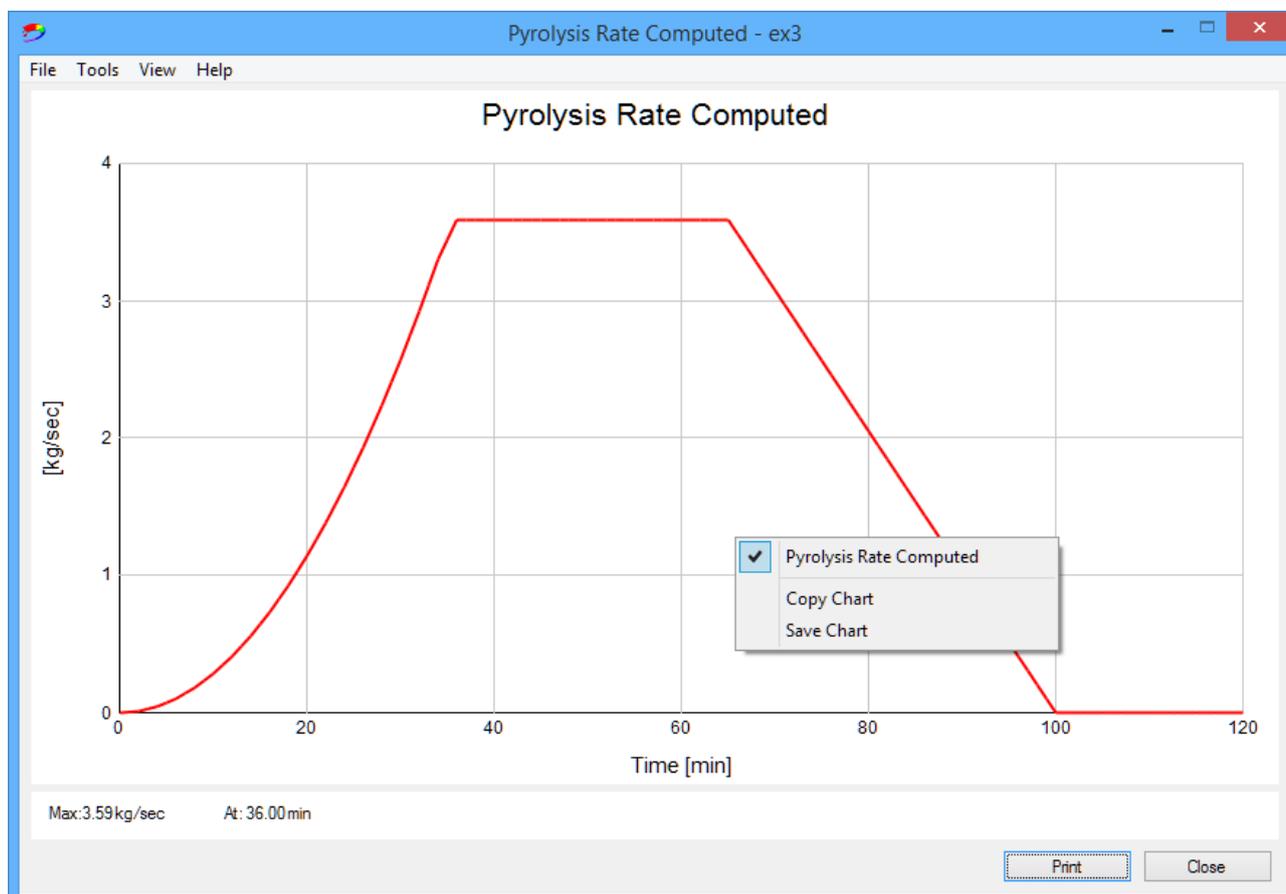


Fig. 2 Janela do gráfico

Dependendo dos dados impressos na janela de gráficos, o utilizador pode apresentar até três séries num gráfico, selecionando o nome das séries do menu (botão direito do rato) na janela do gráfico (ver Fig. 3).

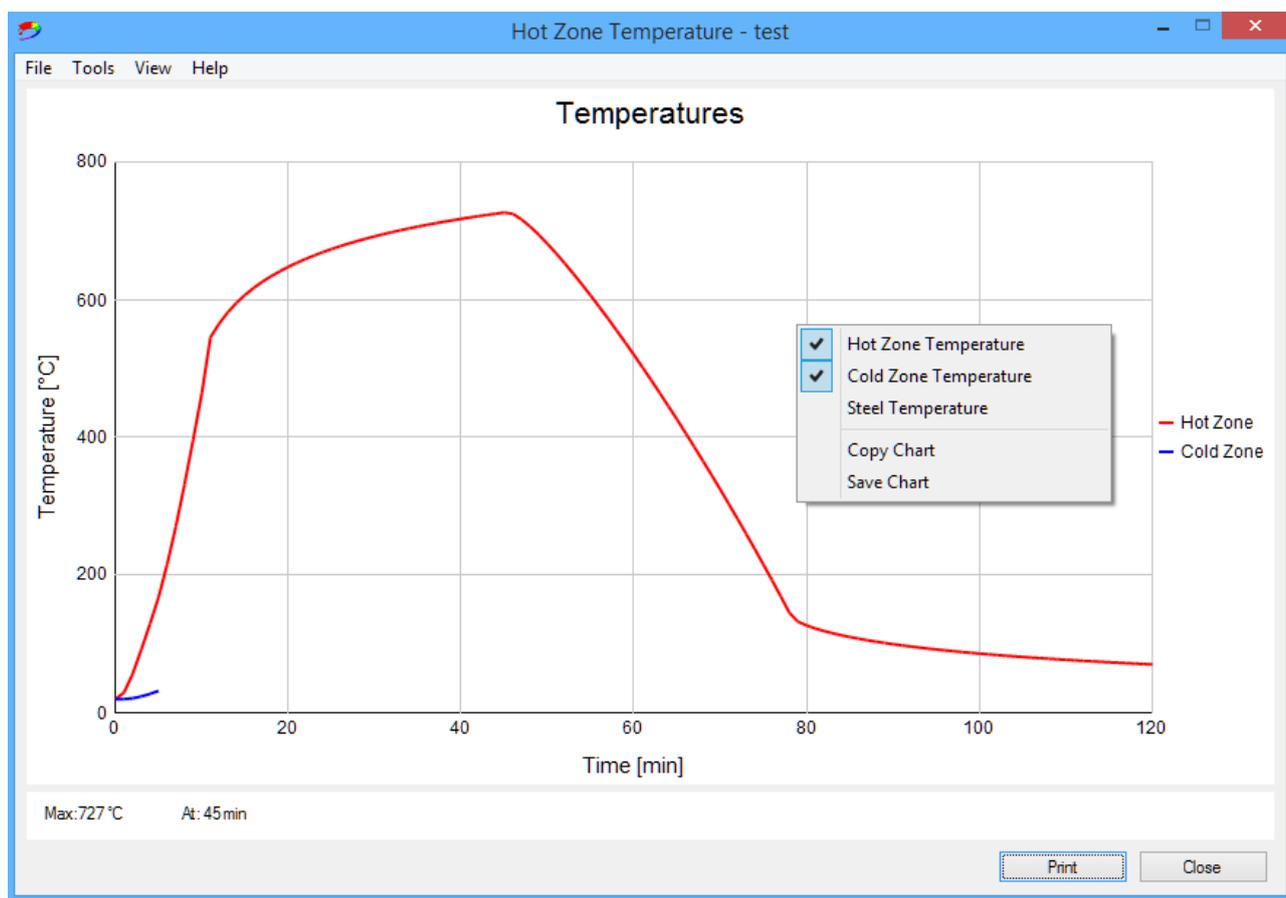


Fig. 3 Janela do gráfico

A pasta onde a análise é guardada irá conter os seguintes ficheiros, além do ficheiro de análise (com a extensão *.ozn):

- Nomedoficheiro.pri – é o ficheiro de saída de resultados, contendo a temperatura da camada superior de gases quentes, temperatura da camada inferior, etc.
- Nomedoficheiro.out – é o ficheiro de saída de resultados, contendo resultados sobre os revestimentos do compartimento bem como o critério de alternância do modelo de duas zonas para uma zona.
- Nomedoficheiro.nat – é o ficheiro de saída que contém a temperatura do gás quando é selecionado incêndio localizado ou o máximo entre os dois na janela “Aquecimento”;
- Nomedoficheiro.flx – é o ficheiro de saída de resultados que contém a evolução do fluxo de calor para incêndios localizados;
- Nomedoficheiro.stt – é o ficheiro de saída de resultados que contém a evolução da temperatura do aço, protegido ou não protegido.

Nem todos os ficheiros serão apresentados na pasta onde o ficheiro de análise é guardado, dependendo do tipo de incêndio (compartimento ou localizado) e do cenário de aquecimento.

3 JANELA PRINCIPAL

O OZone permite ao utilizador aplicar uma abordagem prescritiva (fogos nominais) para gerar a ação térmica ou abordagens baseadas no desempenho, em que as ações térmicas são determinadas utilizando abordagens de Modelo de Zona.

A janela principal está estruturada em duas colunas (ver Fig. 4).

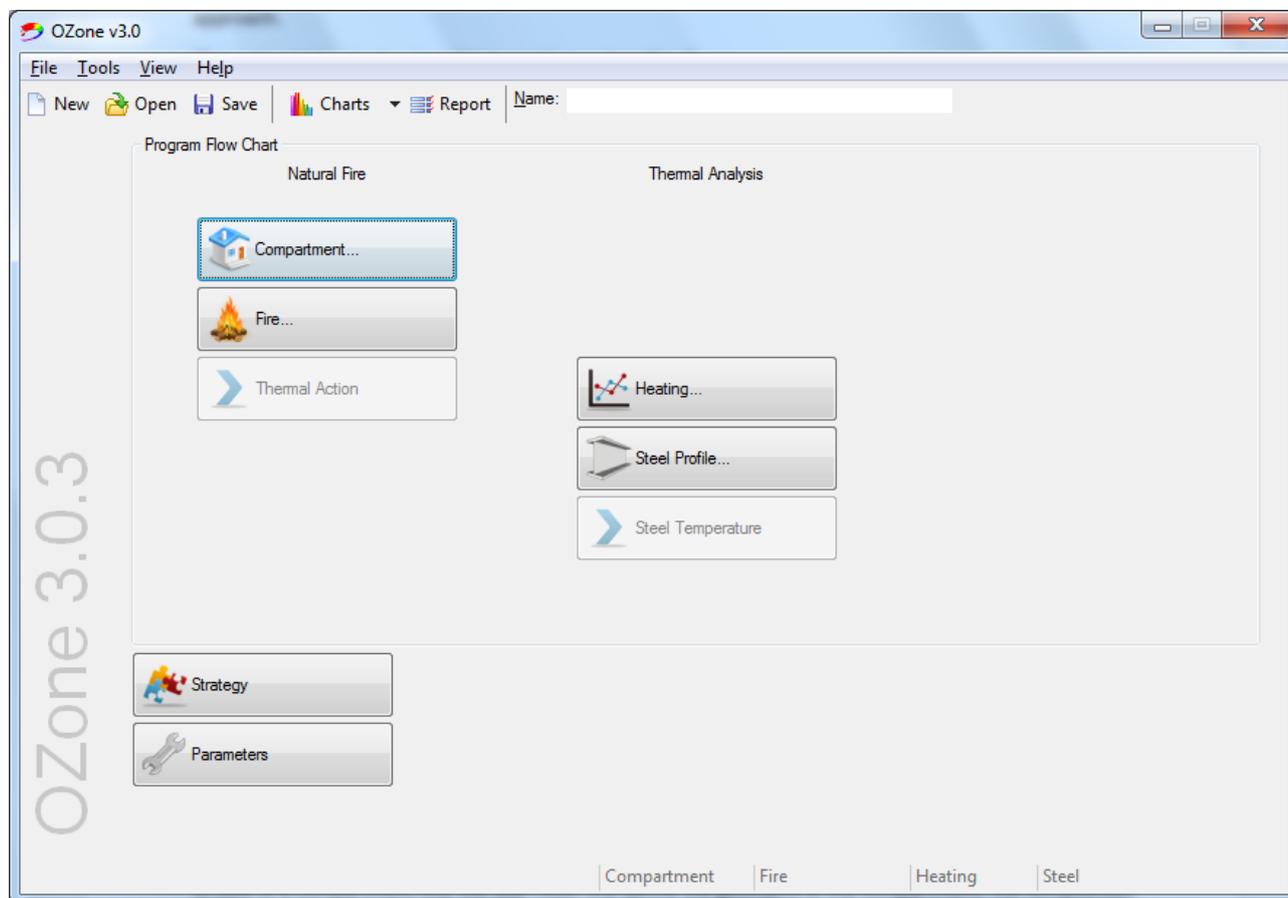


Fig. 4 Janela principal

A coluna “Incêndio Natural” refere-se à ação térmica avaliada para modelos de incêndio de zona para compartimentos ou incêndios localizados.

No caso de incêndio em compartimento, o utilizador deve definir a geometria do compartimento, a composição das paredes, teto e pavimento, bem como as dimensões e localização das aberturas, na janela “Compartimento”, explicado no Capítulo 4. Na janela “Incêndio”, explicado no Capítulo 5, o utilizador define o incêndio, com base no procedimento do Anexo E da EN 1991-1-2 ou através da introdução direta dos dados (definido pelo utilizador).

No caso de incêndio localizado, o utilizador pode saltar a janela “Compartimento”. O incêndio pode ser definido diretamente no interior da janela “Incêndio”, de forma a representar um incêndio localizado num espaço aberto. O incêndio localizado também pode ser considerado no interior do compartimento. Nesse caso, o compartimento deve ser definido no interior da janela “Compartimento”.

A análise é realizada através da seleção do botão “Ação Térmica”.

A coluna “Análise Térmica” da janela principal permite calcular a evolução da temperatura no perfil de aço, com base na ação térmica calculada através de um incêndio natural (primeira coluna), ou com base em curvas nominais de incêndio. A seleção da ação térmica (curva de incêndio nominal, incêndio em compartimento, incêndio localizado) é realizada na janela “Aquecimento”.

No caso da ação térmica ser anteriormente determinada utilizando modelos de incêndio natural, o perfil de aço pode ser aquecido considerando na janela “Aquecimento” quer a temperatura da camada superior de gases quentes (de um incêndio em compartimento) quer a temperatura de um incêndio localizado.

Se as características do compartimento forem definidas na janela “Compartimento”, e se for definido um incêndio localizado na janela “Incêndio”, o utilizador também pode considerar para o aquecimento do perfil de aço o máximo fluxo de calor entre a camada superior de gases quentes (incêndio em compartimento) e o incêndio localizado. Neste caso, não há necessidade de definir um incêndio no compartimento (Anexo E – EN 1991-1-2 / Incêndio Definido pelo Utilizador) no interior da janela “Incêndio”.

No caso de curvas de incêndio nominal, não há necessidade de passar na primeira coluna “Incêndio Natural” da janela principal. O utilizador seleciona diretamente a curva nominal na janela “Aquecimento”.

A definição de se o perfil de aço é protegido ou não protegido é realizada na janela “Perfil de Aço”. A análise é realizada através da seleção do botão “Temperatura do Aço”.

As janelas “Estratégia” e “Parâmetros” são explicadas no Capítulos 6 e 7.

4 JANELA COMPARTIMENTO

Quando é simulado um incêndio num compartimento no OZone, o primeiro passo é seleccionar a forma do compartimento (ver Fig.5): piso retangular (com cobertura plana, cobertura de uma água ou cobertura de duas águas), ou um piso não retangular (qualquer compartimento) com uma cobertura plana.

Para compartimentos de cobertura retangular as dimensões i.e. Comprimento, Altura e Profundidade devem ser introduzidas, em metros. Para compartimentos com coberturas não retangulares, o número máximo de paredes é 4, e a área da superfície do compartimento deve ser indicada em m².

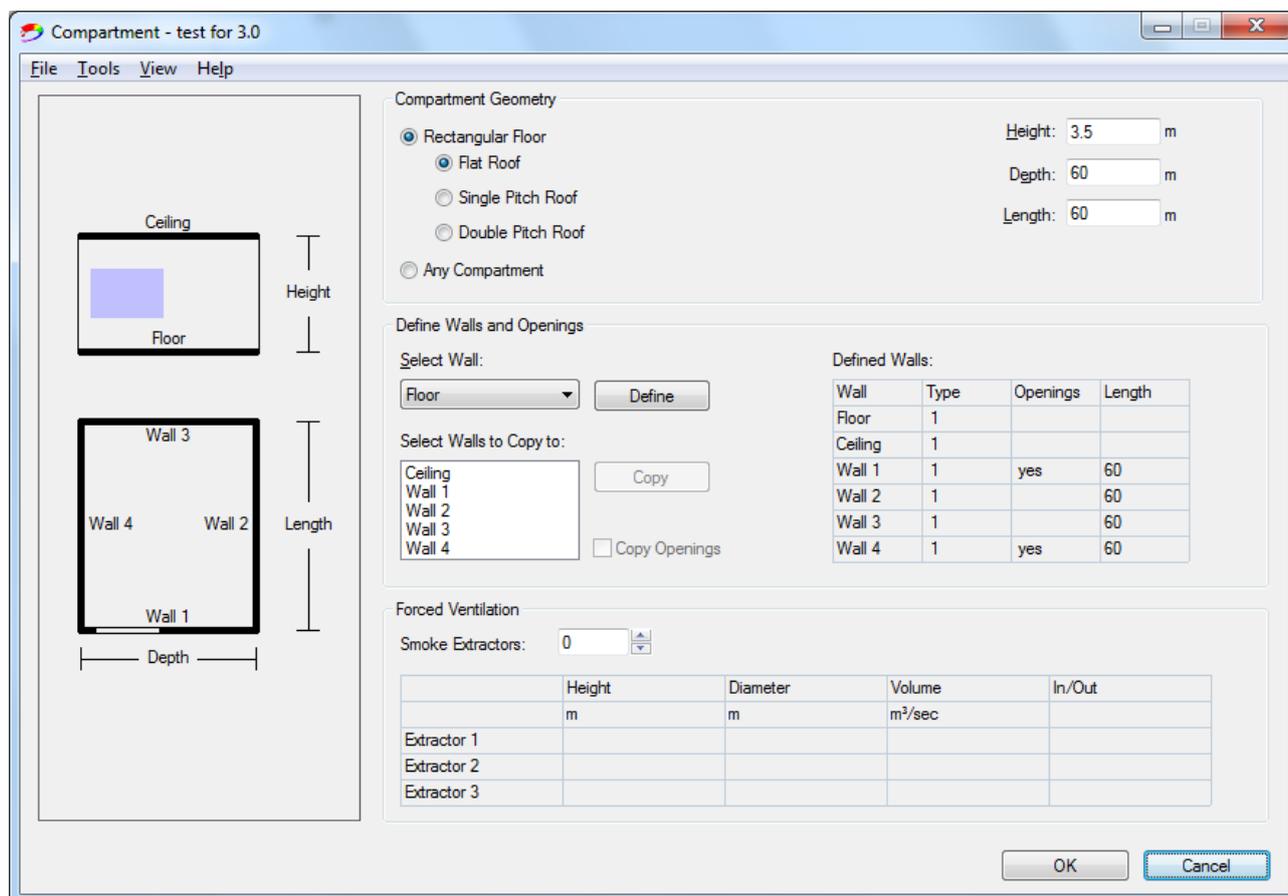


Fig. 5 Janela compartimento

Para definir os revestimentos do compartimento (pavimento/ teto/ parede), seleccionar o item correspondente da lista “Selecione a Parede” e clicar no botão “Definir”. Isto abrirá a janela de definição de revestimentos do compartimento, (ver Fig. 5).

Cada revestimento do compartimento (paredes, teto e pavimento), acima de 4 camadas pode ser definido através da espessura. Se forem considerados múltiplas camadas, elas devem ser definidas do interior para o exterior, começando pela Camada 1 (interior). Para materiais pré-definidos da lista de materiais, apenas deve ser introduzida a espessura da camada. O utilizador pode definir qualquer material através da introdução de todas as características na tabela (peso volúmico, condutividade, calor específico, emissividade relativa na camada superior e na camada inferior) (ver Fig. 6).

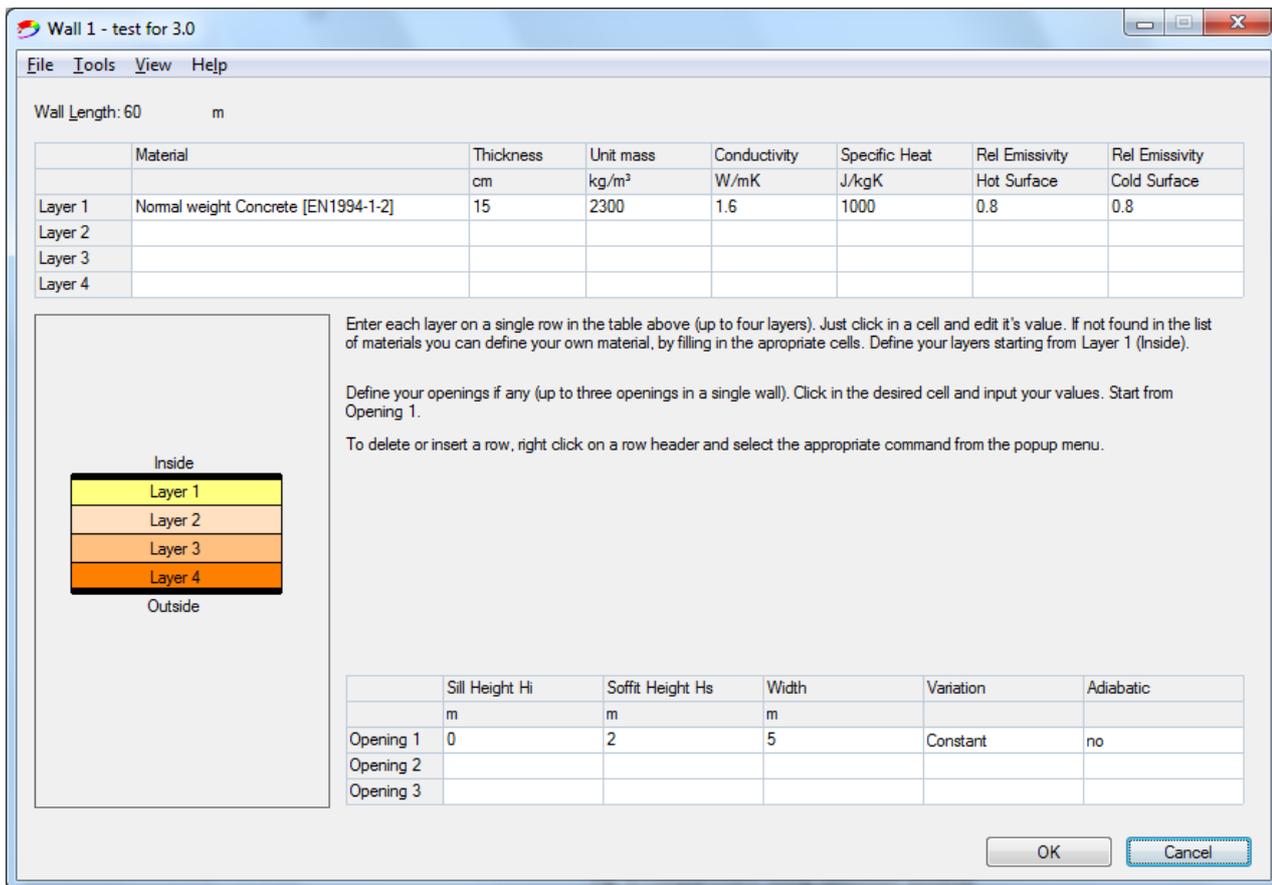


Fig. 6 Janela de definição dos revestimentos do compartimento

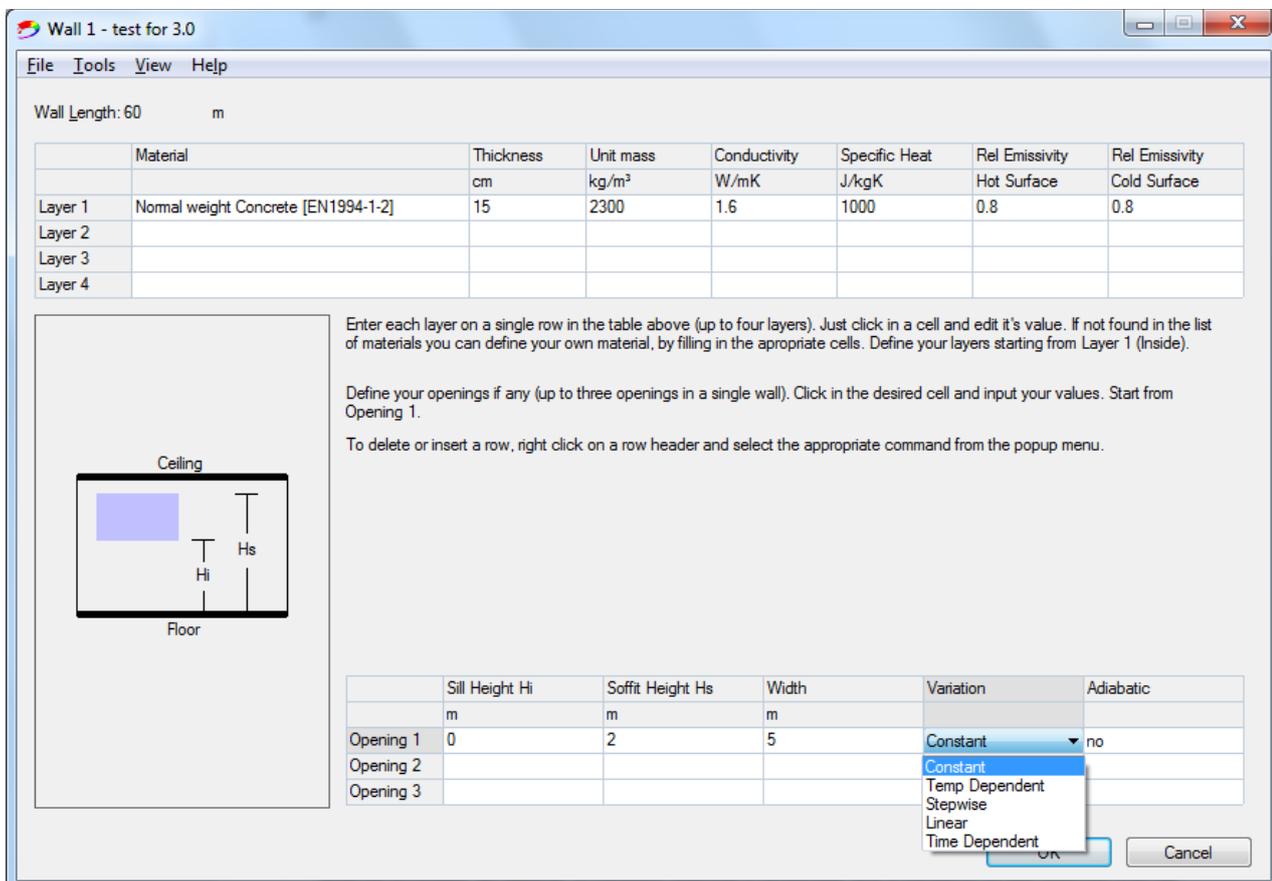


Fig. 7 Definição das aberturas verticais

As aberturas horizontais e/ou verticais podem ser definidas nas paredes e no teto, no interior da janela de definição dos revestimentos do compartimento.

Para uma parede, podem ser definidas até 3 aberturas. A altura superior do vão, altura do peitoril e largura devem ser introduzidas para cada abertura, em metros (ver Fig. 7). Por defeito, é proposta uma abertura constante, mas pode ser selecionada uma abertura variável através da lista “Variação”. As opções (dependente da temperatura/ de forma gradual/ linear/ dependente do tempo) são explicadas no Capítulo 7 “Parâmetros”. Para a opção “Adiabática” e explicações detalhadas sobre as trocas de calor através das aberturas, ver o Anexo B.

Quando é definido o teto, as aberturas horizontais podem ser definidas na tabela inferior, ver Fig. 8. Podem ser definidos até três grupos de aberturas de igual diâmetro. Deve ser indicado o diâmetro em metros e o número de aberturas de cada grupo. Por defeito, é proposta uma abertura constante, mas pode ser selecionada uma abertura variável através da lista “Variação”. As opções (dependente da temperatura/ de forma gradual/ linear/ dependente do tempo) são explicadas no Capítulo 7 “Parâmetros”.

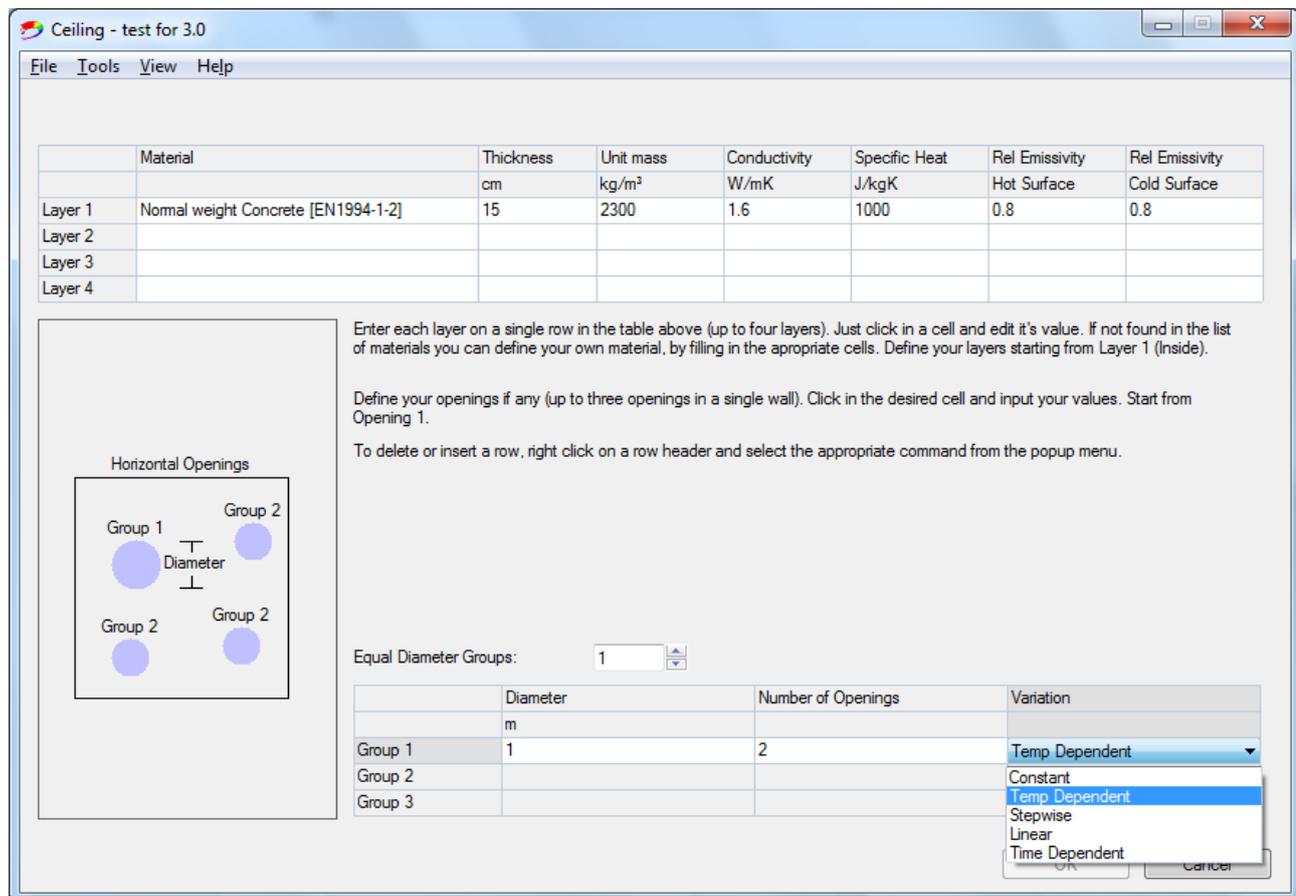


Fig. 8 Definição das aberturas horizontais

Também pode ser definida ventilação forçada na tabela inferior da janela de definição do compartimento (ver Fig. 5). Podem ser introduzidos até 3 aparelhos, através da definição do diâmetro e altura em metros acima do nível do pavimento, volume de entrada de ar e exaustão de ar em m^3/sec . Para uma explicação sobre os extratores de fumo ver o Anexo B.

5 JANELA INCÊNDIO

A janela “Incêndio” permite a definição de um incêndio em compartimento (utilizando o Anexo E da EN 1991-1-2 e os correspondentes anexos nacionais ou um Incêndio Definido pelo Utilizador) ou um Incêndio Localizado, ver Fig. 9.

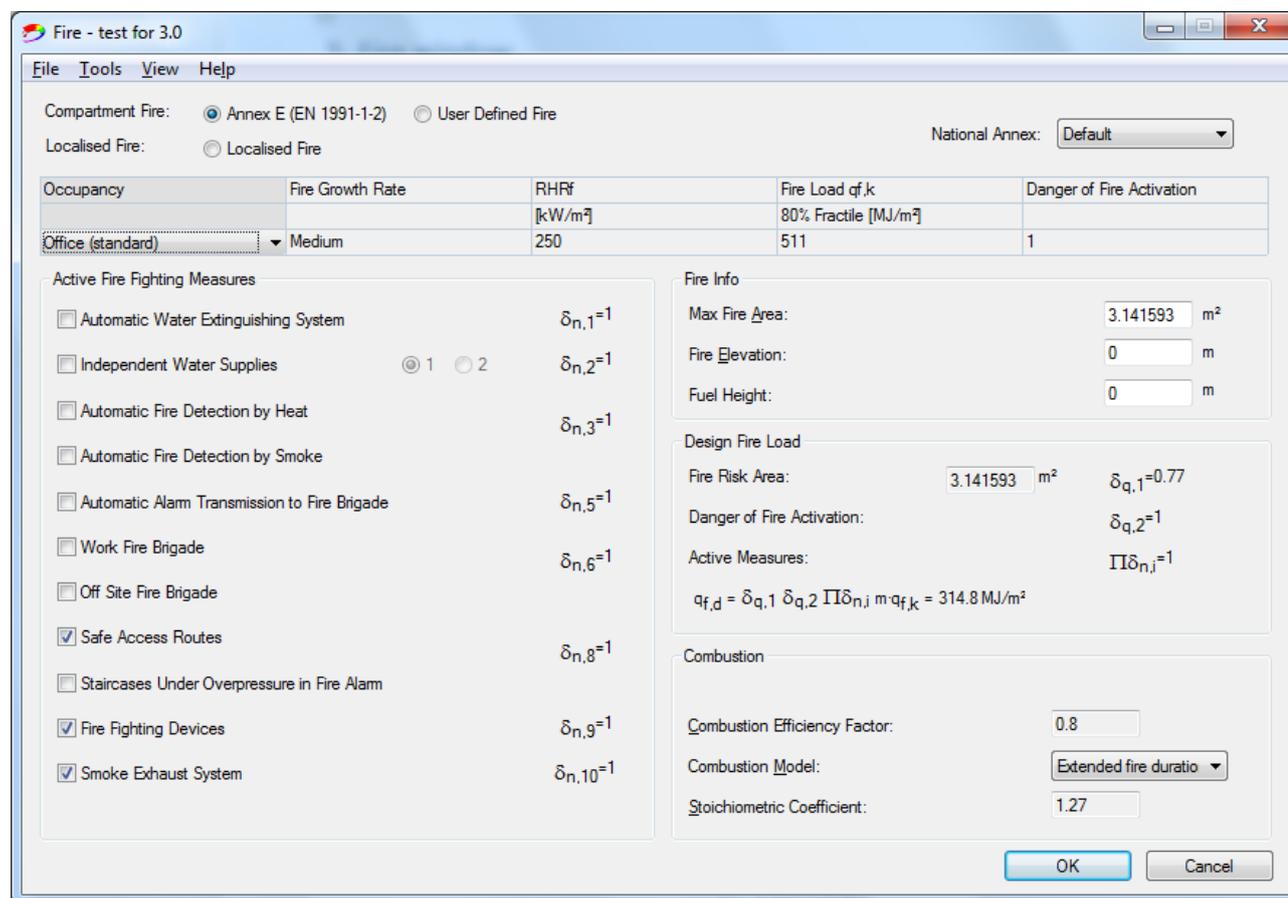


Fig. 9 Janela incêndio

5.1 Incêndio em Compartimento – Anexo E (EN1991-1-2)

Por defeito, são propostos valores para o Anexo E da EN 1991-1-2, mas o utilizador pode seleccionar o Anexo Nacional da lista “Anexo Nacional” ou definir os valores. O Anexo D apresenta os parâmetros nacionais para a aplicação do incêndio natural nos diferentes países Europeus, para os quais os Anexos Nacionais estão disponíveis no OZone.

No interior desta janela, de acordo com o Anexo E da EN 1991-1-2 (padrão), a densidade de carga de incêndio de cálculo é dada por:

$$q_{f,d} = m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \Pi \delta_{ni} \cdot q_{f,k}$$

Primeiro, devem ser introduzidos os parâmetros relacionados com a ocupação (taxa de crescimento do incêndio/máxima taxa de libertação de calor/características da densidade da carga de incêndio/perigo de ativação do incêndio). O OZone contém valores tabelados para estes parâmetros, de acordo com o Anexo E da EN 1991-1-2, que podem ser escolhidos da lista “Ocupação”. Se forem necessários outros valores, o utilizador pode seleccionar a opção “Definido Pelo Utilizador” na mesma lista.

A densidade de carga de incêndio característica $q_{f,k}$ é o quantilho de 80% da distribuição da carga de incêndio obtido através da observação em compartimentos reais. Os dados estão disponibilizados para diferentes tipos de ocupação dos compartimentos. De forma a obter-se a carga de incêndio característica, a massa de combustível presente nos

compartimentos foi medida e depois multiplicada pelo calor de combustão do combustível e dividida pela área do pavimento do compartimento. O completo calor de combustão é considerado nestas análises.

A fase de crescimento do incêndio é caracterizada pela Taxa de Crescimento do Incêndio t_a , representando o tempo a que a área de incêndio A_f cresce para um valor que leva a uma taxa de libertação de calor de 1MW.

A Máxima Taxa de Libertação de Calor por Unidade de Área de Incêndio (RHR_f) é a máxima quantidade de energia que pode ser libertada por unidade de área na fase estacionária para situações do incêndio ser controlado pelo combustível. A RHR_f é fornecida no Anexo E da EN 19991-1-2 para diferentes tipos de ocupação dos compartimentos. Os valores de RHR_f representam incêndios reais e têm em conta a combustão incompleta.

A Taxa de Crescimento do Incêndio, a Máxima Taxa de Libertação de Calor por unidade de área de incêndio e a Densidade de Carga de Incêndio Característica são indicadas no Anexo E da EN 1991-1-2 em função da ocupação.

A influência do perigo de ativação do incêndio é tida em conta através dos fatores δ_{q2} indicados no Anexo E da EN 1991-1-2.

A influência das medidas ativas de combate a incêndio é tida em conta através dos fatores $\delta_{n,i}$ indicados no Anexo E da EN 1991-1-2. O utilizador deve assinalar ou não assinalar as opções no grupo “Medidas Ativas de Combate a Incêndio”, em função da sua disponibilidade.

A influência da área do compartimento é tida em conta através do fator δ_{q1} , automaticamente calculado em função da área do compartimento. Os valores δ_{q1} são estimados através da equação (1). Esta lei foi obtida através do ajuste de valores da tabela E1 da EN 1991-1-2.

$$\delta_{q1} = 0.1688 \cdot \ln(A_f) + 0.5752 \quad (1)$$

A máxima área de incêndio $A_{fi,max}$ é a máxima área queimada de combustível, i. e. a máxima área de pavimento em que o combustível está presente. Na maioria dos casos, a área máxima de incêndio pode ser considerada igual à área do pavimento. Por defeito, o OZone considera este valor, calculado através dos dados introduzidos na janela “Compartimento”. O utilizador pode considerar diferentes valores para a área máxima de incêndio, que pode ser inferior à área do compartimento.

A elevação do incêndio por defeito é considerada ao nível do pavimento. O utilizador pode introduzir outra elevação para a fonte de incêndio (ver Fig. 10). Isto condiciona o critério de *Flashover*, explicado no Anexo F.

A altura do combustível por defeito é considerada ao nível do pavimento. O utilizador pode definir outro valor para a altura máxima do material combustível no interior do compartimento (ver Fig. 10). Isto condiciona o critério de *Flashover*, explicado no Anexo F.

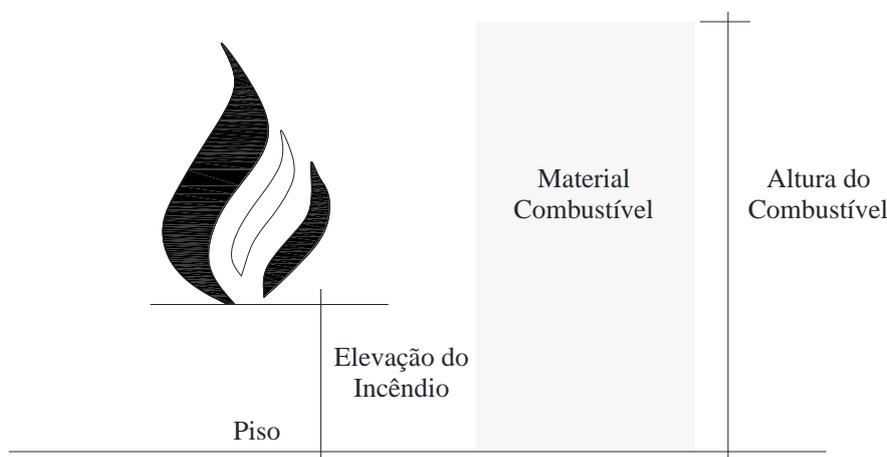


Fig. 10 Elevação do incêndio e altura do combustível

Por defeito o fator de eficiência da combustão é considerado com o valor indicado na EN 1991-1-2, i.e. $m = 0.8$. O utilizador pode introduzir outro valor, em função da ocupação e do tipo da carga de incêndio.

Os utilizadores do OZone têm de escolher entre os três modelos de combustão. Escolhendo “Sem Modelo de Combustão”, a presença de oxigénio no compartimento não influencia a taxa de libertação de calor. Quando não existe mais oxigénio disponível no interior do compartimento, o modelo de combustão “Chama Externa” limita a quantidade de energia libertada no interior do compartimento e o modelo de combustão “Duração Alargada do Incêndio” limita a quantidade de energia libertada no interior do compartimento e alarga a duração do incêndio inicial. Mais detalhes são indicados no Anexo C.

O Coeficiente Estequiométrico é considerado no algoritmo do OZone como 1.27. O utilizador pode definir outro coeficiente na opção “Incêndio Definido pelo Utilizador”.

5.2 Incêndio em Compartimento – Incêndio definido pelo utilizador

É possível definir qualquer curva de incêndio no compartimento utilizando a opção “Incêndio Definido pelo Utilizador” no interior da janela “Incêndio”. Como ilustrado na Fig. 11, a tabela à esquerda tem 4 colunas, Tempo (em segundos), RHR (taxa de libertação de calor em MW), mf (taxa de pirólise em kg/s) e a Área de Incêndio em m^2 .

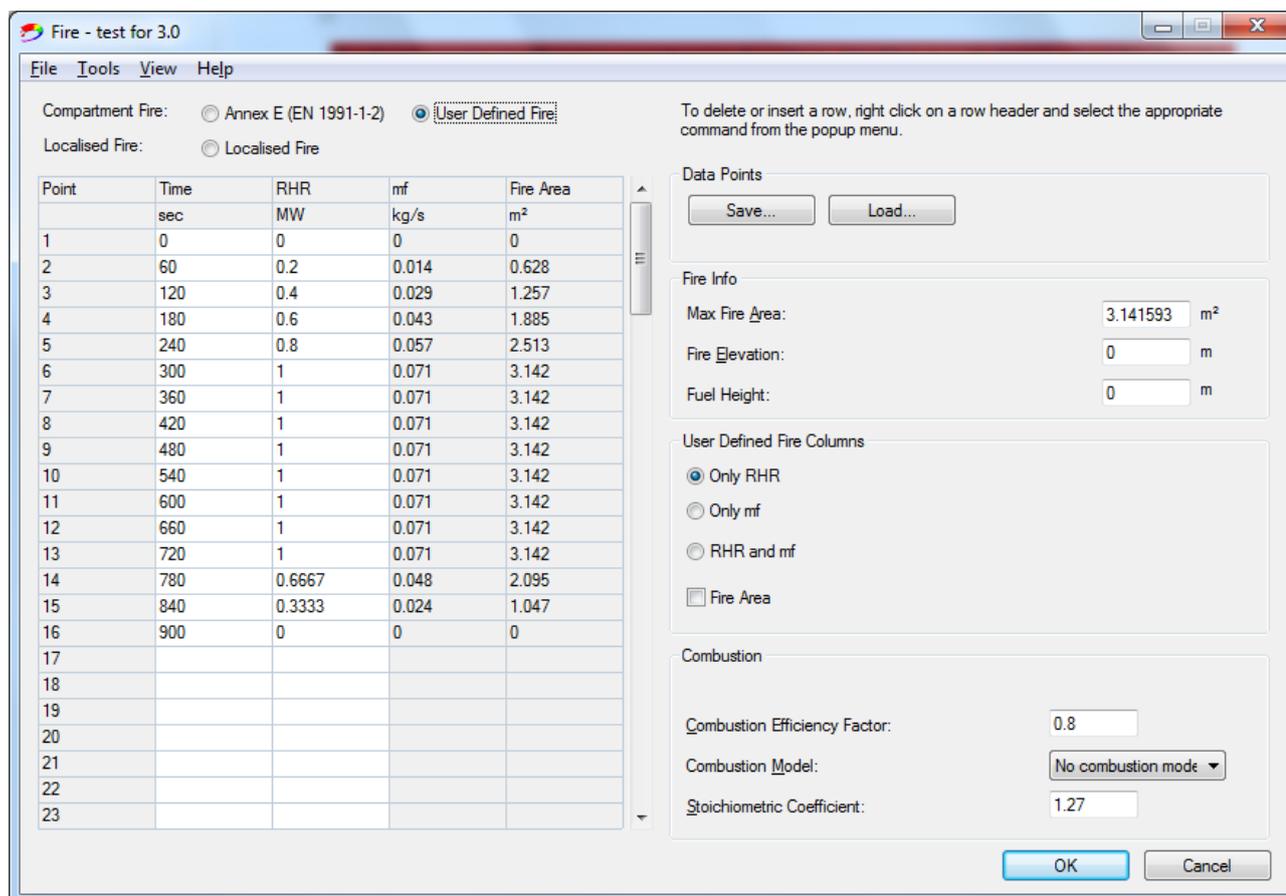


Fig. 11 Janela de Incêndio Definido pelo Utilizador

No interior do grupo “Informação do Incêndio” pode ser introduzida a Máxima Área de Incêndio (em m^2), a Elevação do Incêndio (em m) e a Altura do Combustível (em m) (ver Fig. 9). O significado dos parâmetros no interior do grupo “Combustão” é o mesmo que o explicado no parágrafo anterior (ver Fig. 9).

O grupo “Valores a Introduzir para o Incêndio pelo Utilizador” irá bloquear ou desbloquear algumas das colunas da tabela. Se “Apenas RHR” é selecionado (padrão), apenas as duas primeiras colunas (Tempo e RHR) são editáveis.

Se “Apenas mf” é selecionado, as colunas Tempo e mf são editáveis. Se “RHR e mf” é selecionado, as duas colunas RHR e mf são editáveis ao lado da coluna tempo.

A relação entre os parâmetros é:

$$RHR(t) = m \cdot H_{c,net} \cdot \dot{m}_{fi}(t) \quad (2)$$

onde:

m é o Fator de Eficiência da Combustão

$H_{c,net}$ é o Calor de Combustão do Combustível

Se a área de incêndio é conhecida a cada passo de tempo, o utilizador pode selecionar a caixa de seleção “Área de Incêndio” e a coluna “Área de Incêndio” na tabela à esquerda torna-se editável. Assim, os valores da área de incêndio no tempo podem ser introduzidos na tabela.

Se a área de incêndio no tempo não for conhecida, o OZone calculará $A_{fi}(t)$ de acordo com:

$$A_{fi}(t) = A_{fi,max} \cdot \frac{RHR(t)}{RHR_{max}} \quad (3)$$

onde:

$A_{fi,max}$ é a máxima área de incêndio definida no grupo “Informações do Incêndio”.

São possíveis 4 cenários.

Caso 1. RHR, mf e Área de Incêndio são fornecidas pelo utilizador na tabela

Quando a gama completa de valores estiver disponível, o utilizador pode introduzir as quatro colunas. Este caso corresponde a análises onde foi medida a perda de massa e a taxa de libertação de calor no interior do compartimento. A área de incêndio também é conhecida no tempo. Por exemplo, esta situação pode ocorrer quando é simulado à escala real um ensaio de piscina de incêndio com duas zonas com medição da perda de massa e com medição da RHR por diminuição do oxigénio no dispositivo de extração de gases da camada superior. Nesta situação, não é possível utilizar nenhum modelo de combustão.

Caso 2. RHR e mf são fornecidas pelo utilizador na tabela

Este caso corresponde a testes em que foi medida a perda de massa e a taxa de libertação de calor no interior do compartimento. A área de incêndio não é conhecida e assume-se ser proporcional à taxa de libertação de calor. Nesta situação não é possível utilizar nenhum modelo de combustão.

Caso 3. RHR ou mf e também a área de incêndio são fornecidas pelo utilizador na tabela

Este caso corresponde a testes em que foi medida a perda de massa ou a taxa de libertação de calor no interior do compartimento. As quantidades não conhecidas são deduzidas com base na Eq. (2) e Eq. (3). A área de incêndio é conhecida no tempo. Nesta situação não é possível utilizar nenhum modelo de combustão.

Caso 4. RHR ou mf são fornecidas pelo utilizador na tabela

Este caso corresponde a testes em que a perda de massa ou a taxa de libertação de calor no interior do compartimento foi medida. A área de incêndio é conhecida e assume-se ser proporcional à taxa de libertação de calor. As

quantidades que não são conhecidas são calculadas com base na Eq. (2) e Eq. (3). Os modelos de combustão podem ou não ser utilizados.

O utilizador pode importar os dados para a tabela. Para importar os dados, deve ser preenchido um ficheiro .txt com os dados em duas, três ou quatro colunas na mesma ordem que a tabela. A primeira coluna deve conter o tempo em segundos. Pelo menos duas colunas devem ser definidas (ex. tempo e RHR). O separador dos dados deve ser espaços e não tabulações ou vírgulas.

5.3 Incêndio localizado

Podem ser definidos até 5 incêndios localizados, ver Fig. 12. A tabela superior à esquerda irá conter os seus diâmetros (em m) e posição no pavimento através de coordenadas x e y (em m).

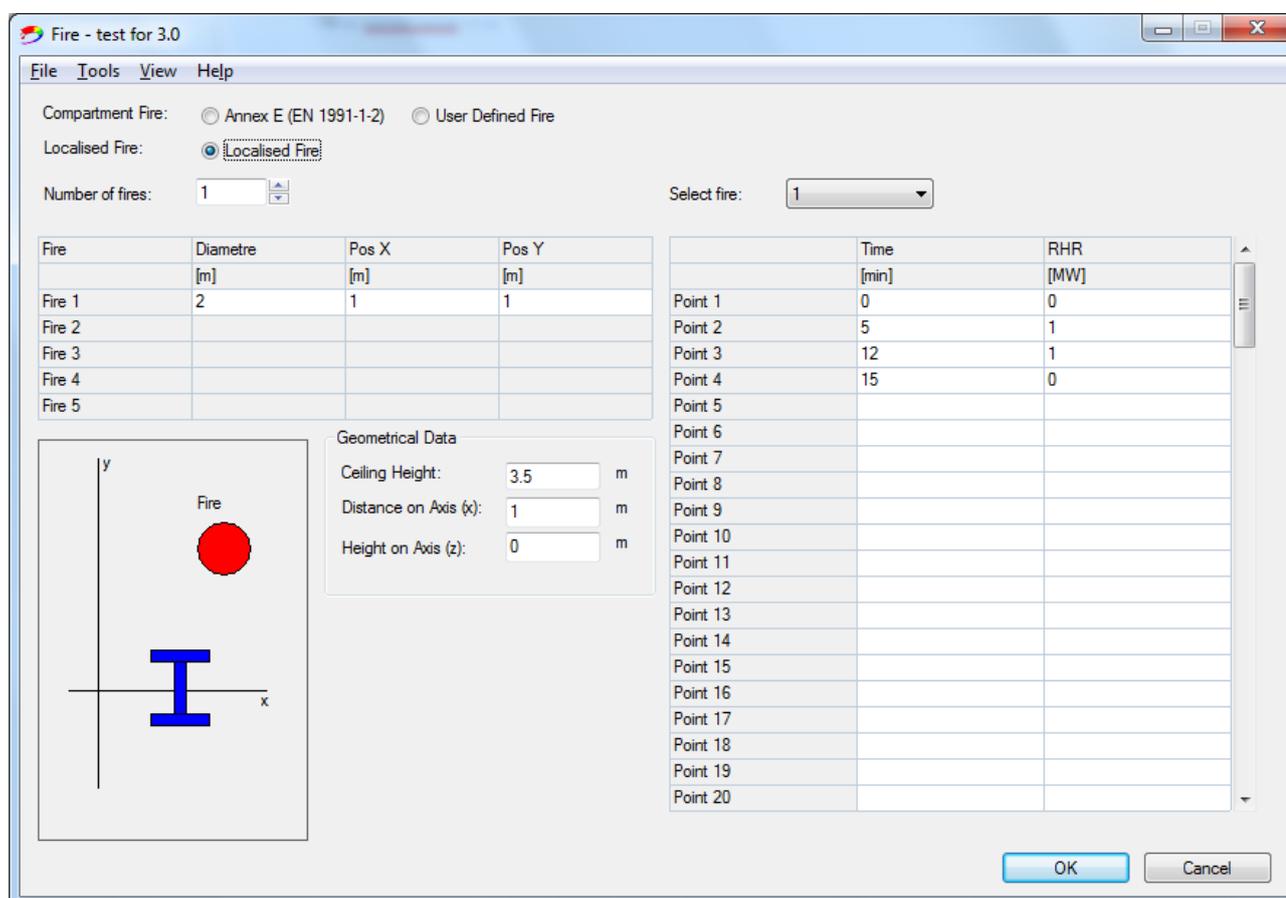


Fig. 12 Janela de Incêndio Localizado

O grupo “Dados Geométricos” define a Altura do Teto (em m) e a localização do ponto onde é calculada a temperatura, através da distância em x (em m) e da elevação desde o pavimento – Altura no Eixo z (em m). Por definição, a coordenada y da coluna é 0.

O incêndio localizado pode ser definido diretamente no interior desta janela, sem ser definido o compartimento, na janela “Compartimento”. Se já tiver sido definido um compartimento na janela “Compartimento”, a altura do teto será automaticamente preenchida como a altura definida no compartimento.

A tabela à direita irá conter a RHR no tempo em MW. O utilizador seleciona o número do incêndio da lista no topo da tabela e preenche a tabela com os valores. Dados provenientes de outras tabelas (como o *excel*) podem ser copiadas através do atalho (Ctrl+V).

No anexo E são apresentados detalhes sobre o procedimento para o cálculo das temperaturas devido a incêndios localizados.

6 JANELA ESTRATÉGIA

A janela “Estratégia” apresentada na Fig. 13 está relacionada apenas com incêndios em compartimentos.

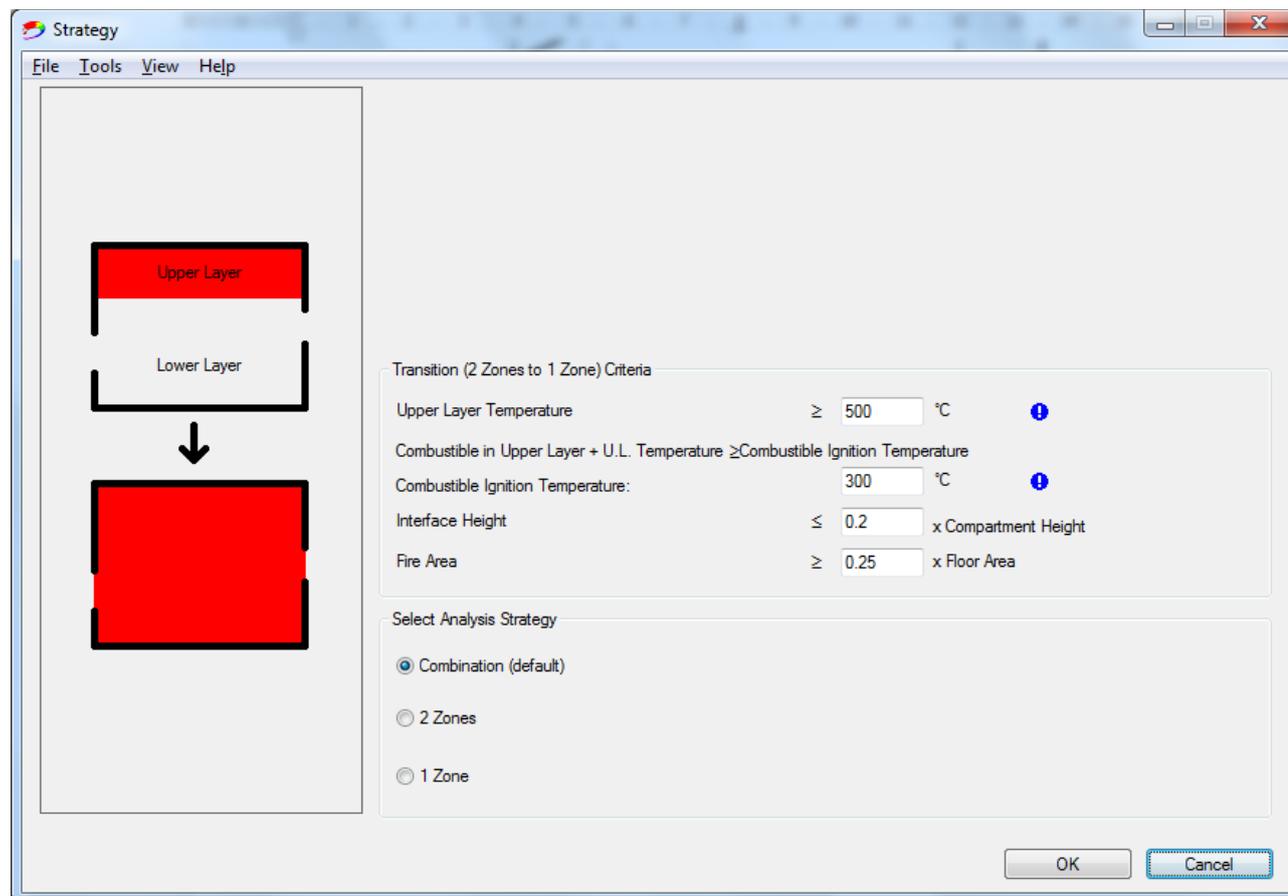


Fig. 13 Estratégia para incêndios em compartimentos

Os modelos de uma zona ou duas zonas são baseados em diferentes hipóteses. De facto, eles correspondem a diferentes tipos de incêndio ou diferentes estados do mesmo incêndio. Eles simplesmente têm diferentes domínios de aplicação sendo complementares. Quando se simula um incêndio num determinado compartimento, é importante saber se um modelo de duas zonas ou um modelo de uma zona é apropriado.

A carga de incêndio pode ser considerada como uniformemente distribuída se o material combustível real estiver presente em mais ao menos em toda a superfície do pavimento e quando a densidade da carga de incêndio real (quantidade de combustível por área de pavimento) é mais ao menos uniforme. Em contrapartida, o material combustível pode ser considerado concentrado numa pequena área de superfície comparada com a área total do piso, não havendo combustível na restante área do pavimento.

A ignição do incêndio é na maioria dos casos localizada e, portanto, o incêndio permanece confinado no interior de determinada área durante um período. Se as temperaturas forem suficientemente altas para provocar ignição espontânea de todo o combustível presente no compartimento, ocorre *flashover*. Geralmente, os modelos de duas zonas são válidos quando o incêndio permanece localizado ou para o *pré-flashover*, enquanto os modelos de uma zona são válidos em casos de incêndios totalmente desenvolvidos ou para o *pos-flashover*. Similarmente, o pressuposto de duas zonas deixa de ser apropriado quando a altura da camada inferior é muito pequena. Finalmente, se a área de incêndio é grande comparada com a área de pavimento, o pressuposto do modelo de uma zona é mais realístico que o modelo de duas zonas.

Está implementada no OZone uma estratégia de combinação automática. Com esta estratégia, a simulação começa sempre com o pressuposto do modelo de duas zonas e, se algum dos critérios para que ocorra *flashover* for atingido (ver anexo F), a simulação irá trocar para um modelo de uma zona.

No interior do grupo “Selecionar Estratégia de Análise”, o utilizador pode impor a utilização do modelo de uma zona ou o modelo de duas zonas, ou então por defeito a estratégia de combinação dos dois modelos.

No grupo “Critério de Transição (2 Zonas para 1 Zona)”, o utilizador pode alterar os valores dos quatro parâmetros que controlam a troca de modelo de duas zonas para modelo de uma zona. É altamente recomendado manter esses valores inalterados, a menos que dados relevantes sejam disponibilizados. O critério de transição do modelo de duas zonas para uma zona e as consequências no modelo da fonte de incêndio são discutidas no Anexo F. As modificações das variáveis principais e das equações de base quando ocorre a troca de modelo zona são apresentadas em detalhe no mesmo anexo (Anexo F).

7 JANELA DE PARÂMETROS

A maioria dos parâmetros utilizados nos cálculos são indicados no interior desta janela, ver Fig. 14.

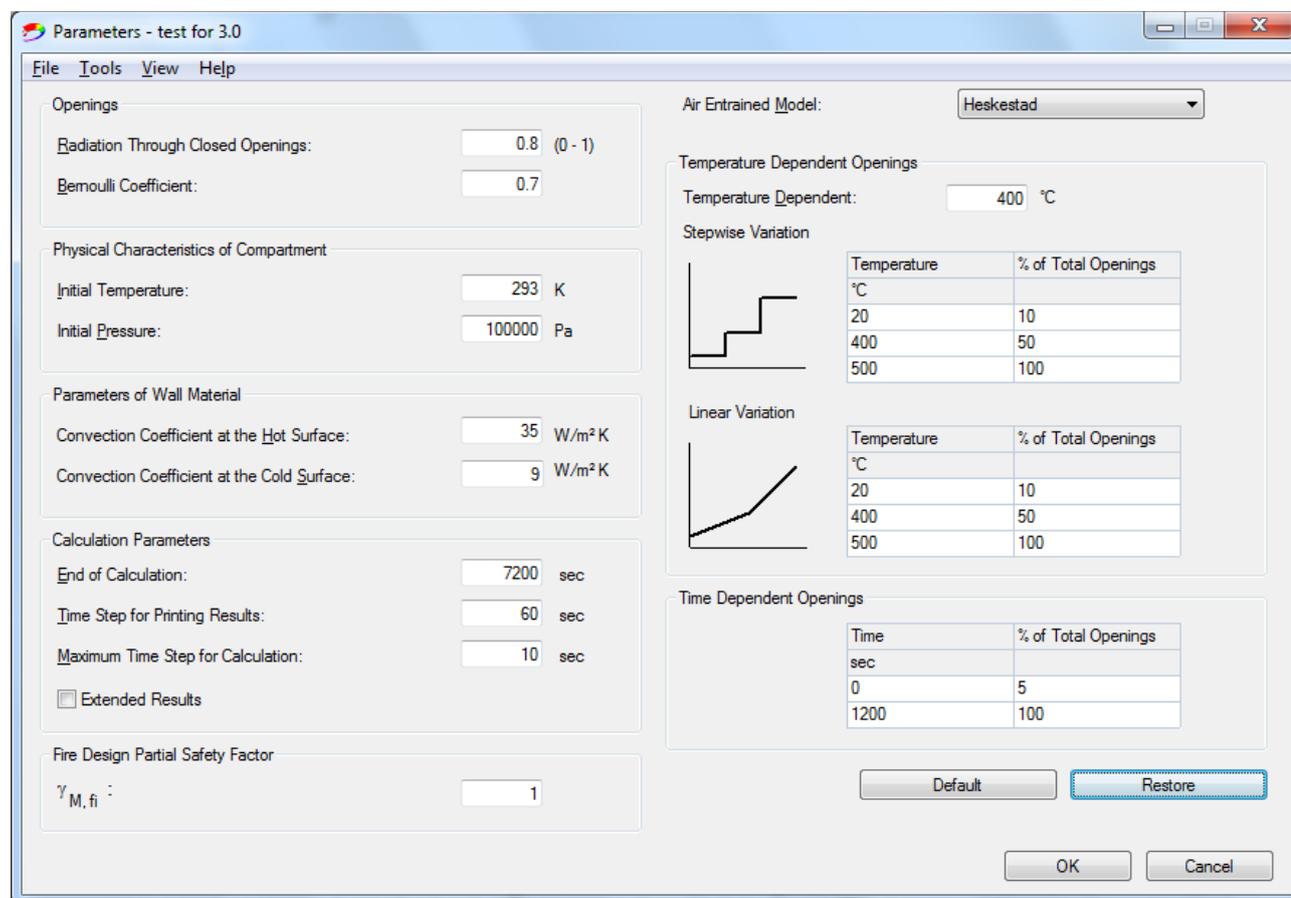


Fig. 14 Janela de parâmetros

7.1 Parâmetros gerais

No lado esquerdo da janela, por padrão são fornecidos os seguintes valores:

- Radiação através das aberturas fechadas: o valor por defeito retirado da literatura é 0.8;
- Coeficiente de Bernoulli: o valor padrão é 0.7;
- Características físicas do compartimento: assumindo a temperatura inicial de 20° C e a pressão do ar de 100000 Pa;
- Parâmetros dos materiais de parede: os coeficientes de convecção para a camada superior/inferior de acordo com a EN 1991-1-2; estes parâmetros referem-se apenas para modelos de incêndio natural, para os incêndios nominais definidos na janela “Aquecimento”, estão implementados os correspondentes valores indicados na EN 1991-1-2;
- Parâmetros de cálculo: por defeito o tempo de análise considerado é duas horas; recomenda-se manter o máximo passo de tempo para cálculo em 10 segundos;
- Fator de segurança parcial de cálculo em incêndio: considerado com o valor padrão da EN 1991-1-2.

7.2 Modelo de entrada de ar

Quando a massa de gases quentes é rodeada por gases frios, a massa mais quente e menos densa irá ascender devido à diferença de densidades ou, dependendo da velocidade do gás, devido à flutuação. Este fenómeno acontece acima da fonte de combustível em chamas. O fluxo flutuante é referido como pluma de incêndio. O ar frio é arrastado pelo aumento de gases quentes, provocando a formação de uma camada de gases quentes abaixo do teto. Foram propostas diferentes expressões analíticas das propriedades da pluma de incêndio por diferentes autores. No OZone foram implementadas quatro dessas expressões.

Deve ser mencionado que algumas dessas fórmulas empíricas foram obtidas através do ajuste do total da taxa de libertação de energia Q e outras através da parte convectiva Q_c . No OZone, assume-se que Q_c é igual a $0.7Q$.

7.2.1 Heskestad

O modelo de Heskestad é o modelo com menos pressupostos com melhor ajuste à pluma CFD, e portanto é considerado como a opção padrão no OZone.

A origem virtual da pluma é altura z_0 :

$$z_0 = 0.083 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D \quad (4)$$

A altura da chama L_{fl} é dada por:

$$L_{fl} = 0.235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D \quad (5)$$

A taxa de fluxo da massa de pluma acima da altura da chama ($z > L_{fl}$) é dada por:

$$m_p = 0.071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 1.92 \cdot \dot{Q}_c \quad (6)$$

A taxa de fluxo da massa de pluma abaixo da altura da chama ($z < L_{fl}$) é dada por:

$$m_p = 1.0056 \cdot \dot{Q}_c \frac{z}{L_{fl}} \quad (7)$$

7.2.2 Zukoski

$$m_p = 0.21 \left(\frac{\rho_\infty^2 g}{c_p T_\infty} \right) \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (8)$$

7.2.3 Mac Caffrey

$$m_p = 0.011 \dot{Q} \left(\frac{z}{Q^{0.4}} \right)^{0.566} \quad \text{para } 0 < \frac{z}{Q^{0.4}} < 0.08 \quad (9)$$

$$m_p = 0.026Q \left(\frac{z}{Q^{0.4}} \right)^{0.909} \quad \text{para } 0.08 < \frac{z}{Q^{0.4}} < 0.20 \quad (10)$$

$$m_p = 0.124Q \left(\frac{z}{Q^{0.4}} \right)^{1.895} \quad \text{para } 0.20 < \frac{z}{Q^{0.4}} \quad (11)$$

7.2.4 Thomas

O modelo de pluma de Thomas destina-se ao arrastamento na zona próxima ou na região da chama, quando a altura média da chama é considerada mais pequena que o diâmetro do incêndio. Nesta região, o ar arrastado é menos influenciado pela taxa de libertação de calor do que pelo perímetro de incêndio, e portanto pelo diâmetro do fogo.

$$m_p = 0.59Dz^{3/2} \quad (12)$$

7.3 Aberturas dependentes da temperatura e do tempo

Durante um incêndio, o número de aberturas e a sua dimensão pode variar. Isto pode resultar da quebra de vidros, aberturas automáticas ou a chegada de bombeiros. No OZone, a dimensão da abertura pode ser definida como função da temperatura da zona em contacto com o vidro (T_Z) ou ser função do tempo.

O critério em função da temperatura da zona pode representar a quebra devido à ação térmica, o critério em função do tempo pode representar a chegada de bombeiros. Existe quatro tipos de variações: uma variação em degrau com a temperatura, uma variação gradual com a temperatura da zona, uma variação linear com a temperatura da zona e uma variação no tempo (ver Fig. 15). Vidros partidos não poderão ser fechados posteriormente. Assim a percentagem de vidro partido é crescente, constante, mas nunca decrescente.

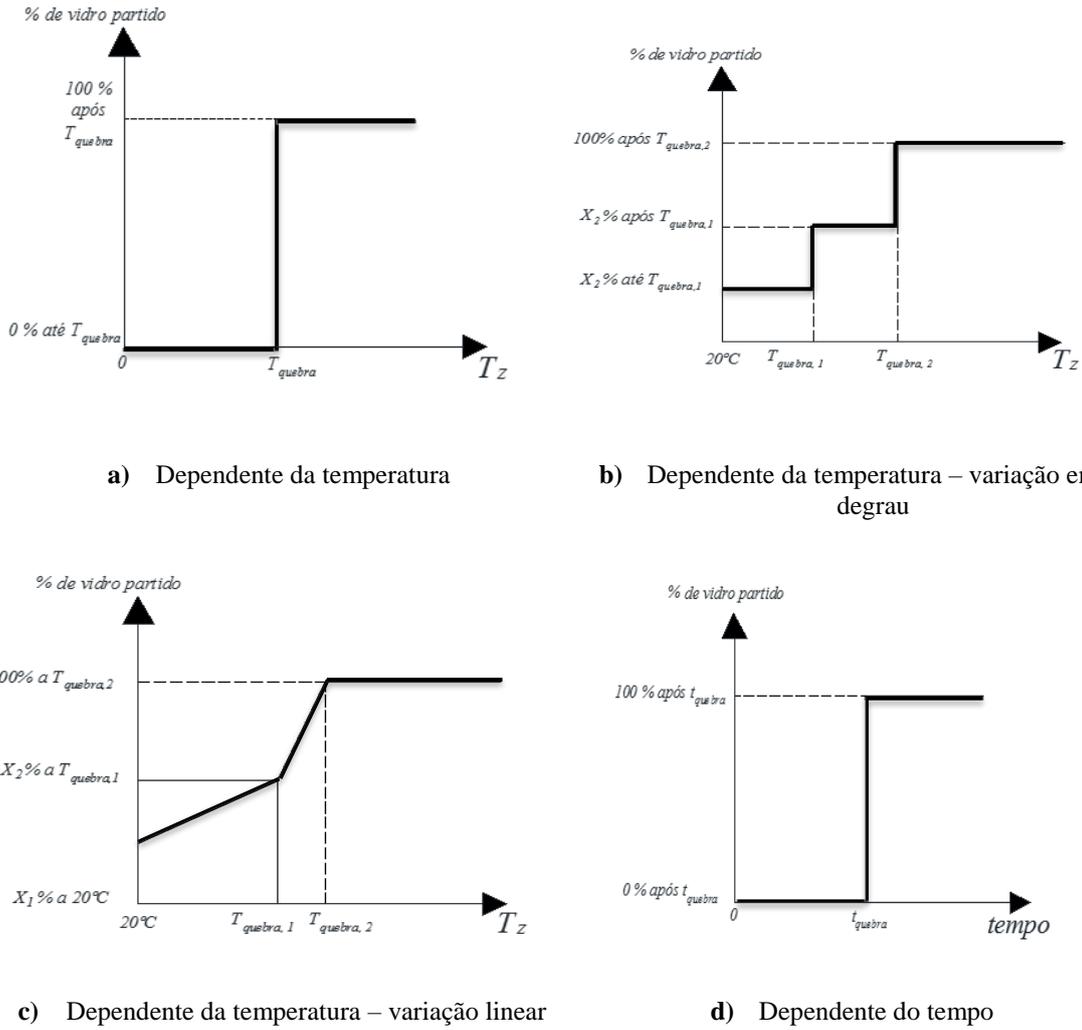


Fig. 15 Aberturas dependentes da temperatura e tempo

A EN 1991-1-2 não indica nenhuma recomendação para as aberturas, no entanto a influência nos resultados pode ser significativa. A ITM SST – 1551.1 é o único documento de conhecimento dos desenvolvedores que faz recomendações sem especificar nenhuma informação. Os desenvolvedores recomendam utilizar os cenários apresentados acima.

8 BOTÃO DA AÇÃO TÉRMICA

Após a definição do Compartimento e do Incêndio, a análise é realizada clicando no botão “Ação Térmica”. O resultado pode ser extraído através do menu “Ver”, ver Fig. 16. Através da seleção do comando “Relatório” é obtido um relatório completo dos resultados, que cria um documento *.doc na mesma pasta do ficheiro da análise (guardado com a extensão *.ozn).

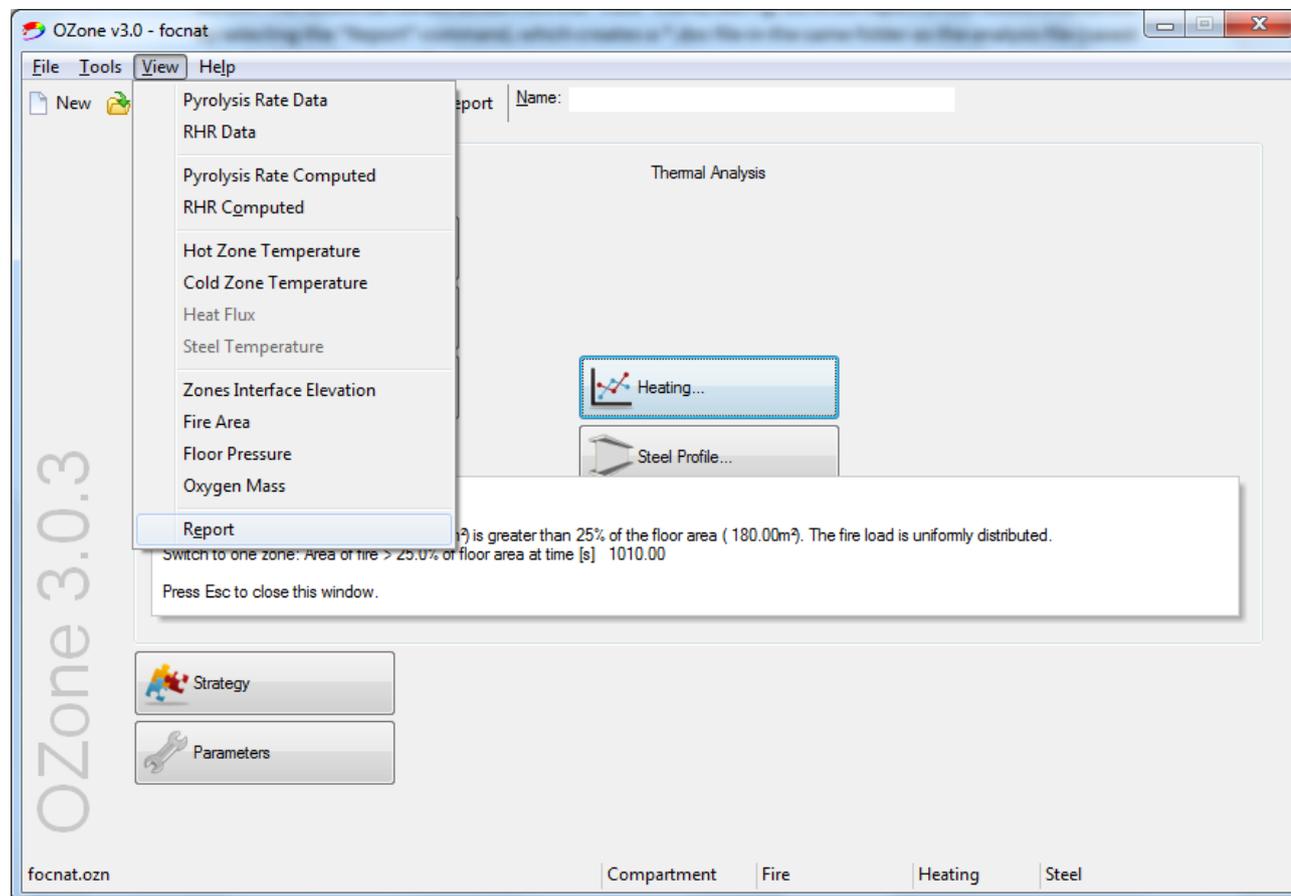


Fig. 16 Janela principal após clicar no botão “Ação Térmica”

Todos os gráficos contidos no ficheiro Relatório podem ser abertos independentemente no menu “Ver”. Através desta janela, os dados podem ser importados para outros programas (*excel*, *word*, *power point*, etc). selecionando o comando “Copiar Gráfico” do menu de contexto, que aparece quando se clica com o botão direito (ver Fig. 2).

9 JANELA AQUECIMENTO

Na janela “Aquecimento” (ver Fig. 17), o utilizador pode selecionar a ação térmica para o aquecimento da secção transversal definida na janela “Perfil de Aço”. Podem ser utilizados incêndios naturais ou nominais.

Se for considerada uma curva de incêndio nominal para o aquecimento do perfil (ISO 853 / ASTM E119 / Hidrocarbonetos), não é necessário definir na coluna de “Incêndio Natural” da janela principal do programa o compartimento e o incêndio.

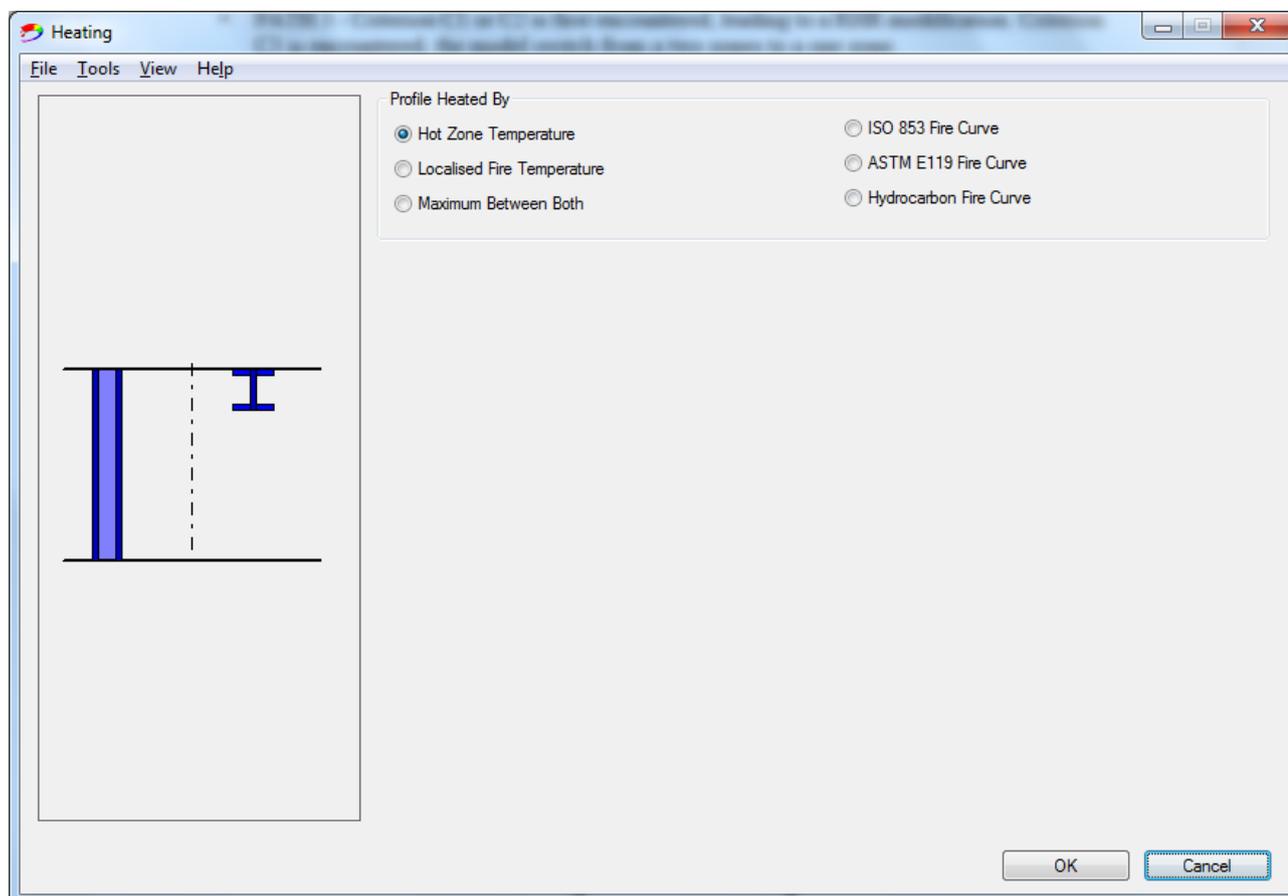


Fig. 17 Janela aquecimento

Para os modelos de incêndio natural, podem ser utilizados vários cenários.

Para incêndios em compartimentos, é necessário definir as características do compartimento e do incêndio. Quando é selecionado o “Anexo E” ou o “Incêndio Definido pelo Utilizador” na janela “Incêndio”, apenas a opção “Temperatura da Camada Superior” fica ativa na janela “Aquecimento”.

Para incêndios localizados, se não for definido nenhum compartimento, assume-se que o incêndio localizado desenvolve-se num espaço aberto e apenas a opção “Temperatura do Incêndio Localizada” fica ativa.

Se for definido um compartimento em conjunto com um incêndio localizado, o OZone calcula as temperaturas das zonas da camada superior de gases quentes e inferior no compartimento (dependendo da estratégia selecionada), considerando automaticamente a “Área Máxima de Incêndio” na janela “Incêndio” como a soma de incêndios localizados na janela “Incêndio Localizado”. Neste caso, o utilizador pode selecionar uma das três opções (Temperatura da Camada Superior / Temperatura do Incêndio Localizado / Máximo Entre os Dois).

A opção “Máximo Entre os Dois” determina a temperatura máxima com base no seguinte algoritmo (ver Fig. 18):

- se o ponto onde a temperatura é calculada (Altura no Eixo (z) na interface) estiver na camada superior de gases quentes definida como a diferença entre a altura do compartimento e a altura da interface (Z_s) então a máxima temperatura entre a camada superior de gases quentes do compartimento de incêndio e o incêndio localizado é aplicada no perfil de aço.
- se o ponto estiver abaixo desta camada a temperatura do incêndio localizada é aplicada ao perfil de aço.

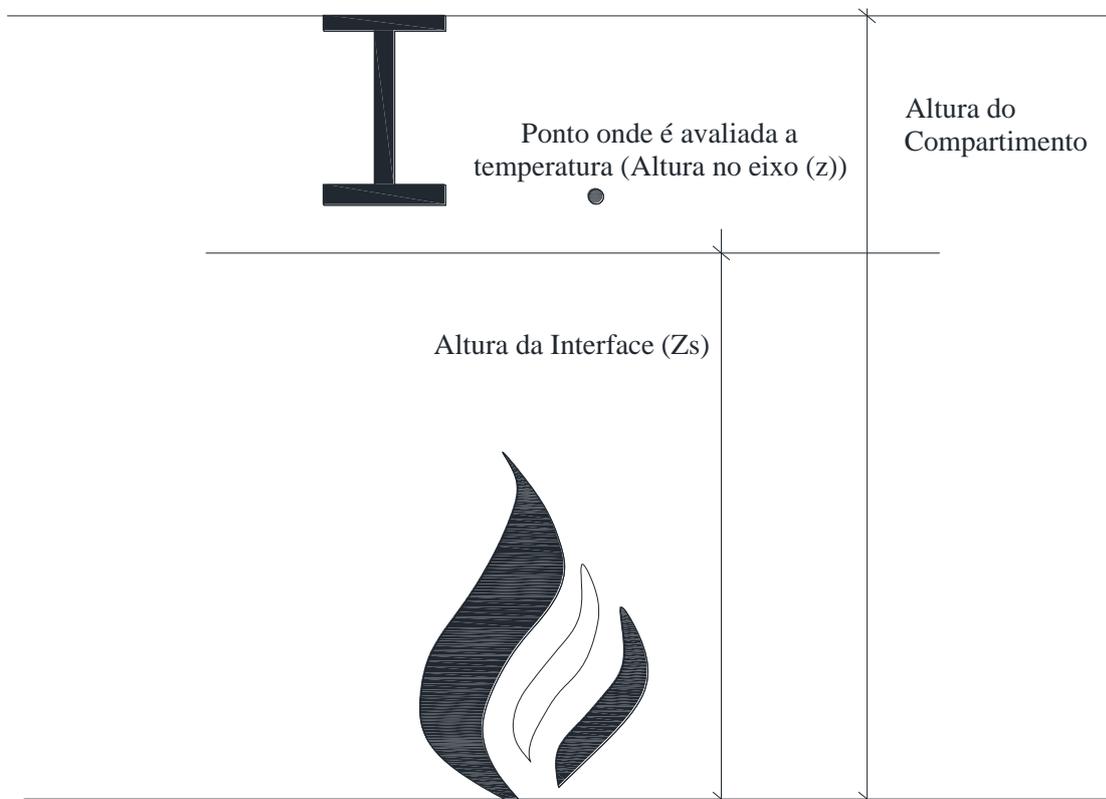


Fig. 18 Algoritmo para o máximo entre os dois casos explicados

10 JANELA DO PERFIL DE AÇO

Após a definição do cenário de aquecimento, o botão “Perfil de Aço” permite definir o tipo de perfil e a exposição. Pode ser considerado como perfil protegido ou não protegido, exposto ao fogo nos quatro lados ou em três lados. No caso de ser definido um incêndio localizado, apenas a opção “Secção Transversal Não Protegida” está ativa.

Podem ser definidas proteções de contorno e revestimentos ocios, considerando propriedades térmicas constantes ou dependentes da temperatura (introduzidas pelo utilizador). Para os materiais de proteção pré-definidos, apenas são fornecidos valores constantes.

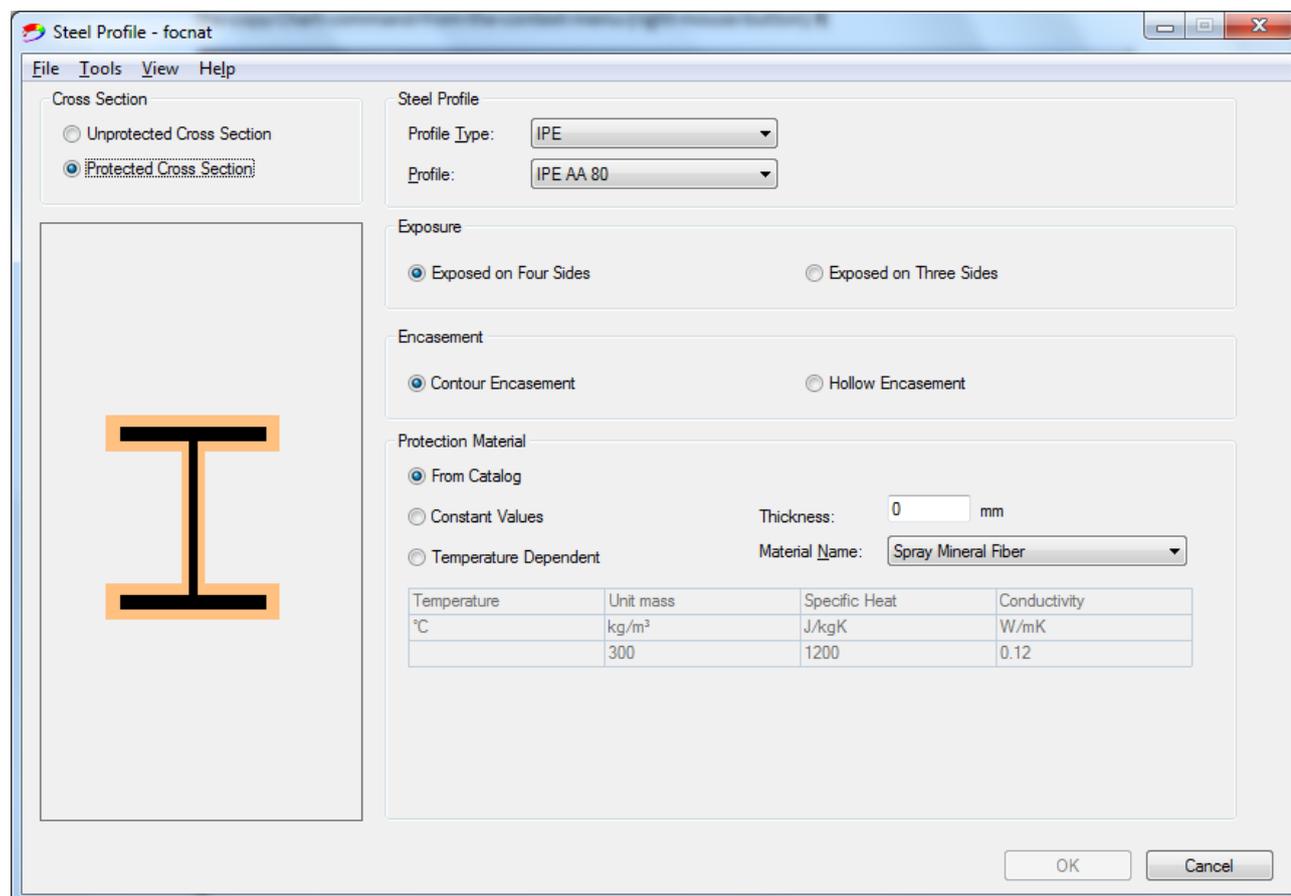


Fig. 19 Janela perfil de aço

11 BOTÃO TEMPERATURA DO AÇO

O aquecimento do perfil de aço protegido ou não protegido é calculado de acordo com os métodos da EN 1993-1-2. A temperatura do gás é a temperatura da camada superior de gases quentes, a temperatura do incêndio localizado ou o máximo destas duas temperaturas.

A evolução da temperatura do aço é calculada utilizando as equações da EN 1993-1-2 para secções transversais de aço protegidas e não protegidas.

A evolução da temperatura – tempo na secção transversal é obtida clicando no botão “Temperatura do Aço”. Como para a análise da temperatura da Zona, os resultados podem ser extraídos através do menu “Ver” e um relatório completo dos resultados é obtido selecionado o comando “Relatório”, que cria um documento *.doc na mesma pasta do ficheiro da análise. Este relatório irá também conter a evolução da temperatura do perfil de aço e as suas características.

O gráfico Temperatura do Aço contido no ficheiro Relatório pode ser aberto independentemente através do menu “Ver”. Através dessa janela, os valores podem ser importados para outros programas (*excel*, *word*, *power point*, etc), selecionando o comando “Copiar Gráfico” do menu de contexto (ver Fig. 20).

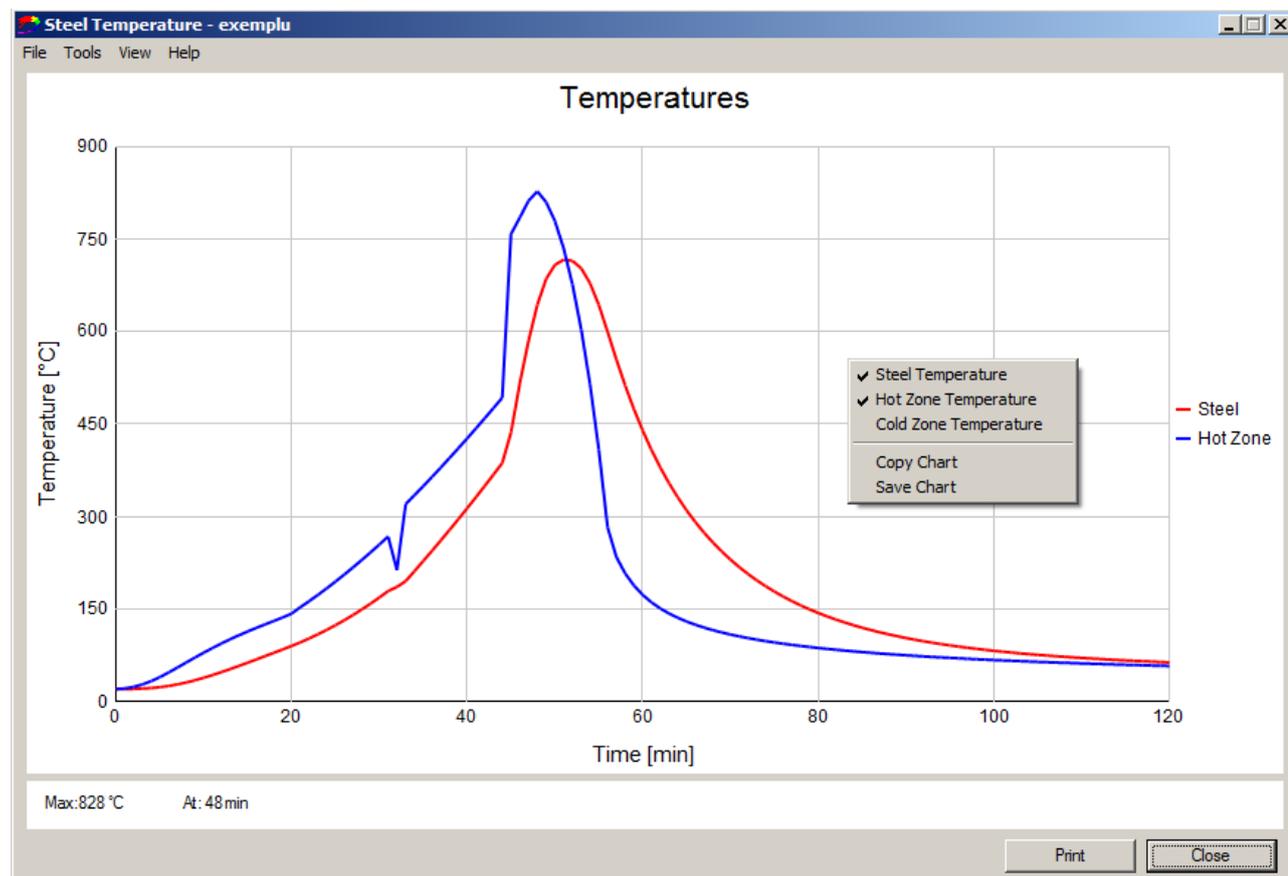


Fig. 20 Janela do gráfico

ANEXO A - FORMULAÇÃO DO MODELO DE ZONA

Este anexo apresenta os fundamentos dos modelos de duas zonas e uma zona. As Figuras A1-2 apresentam representações esquemáticas dos dois modelos.

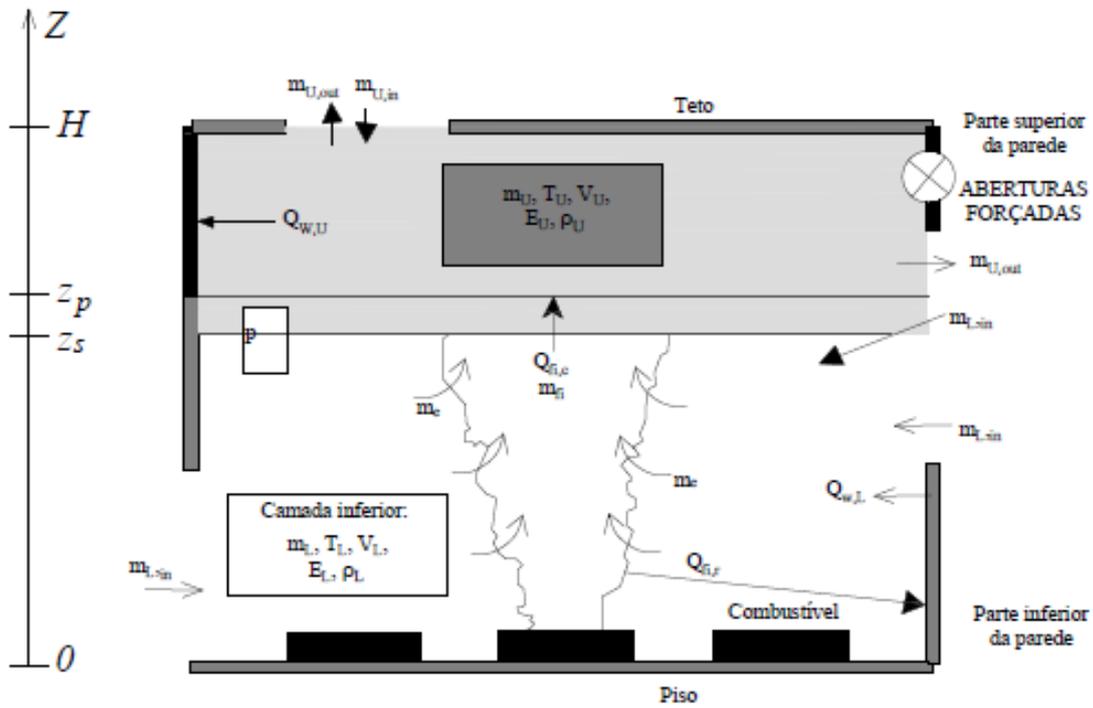


Fig. A1 Representação esquemática do modelo de duas zonas e submodelos associados

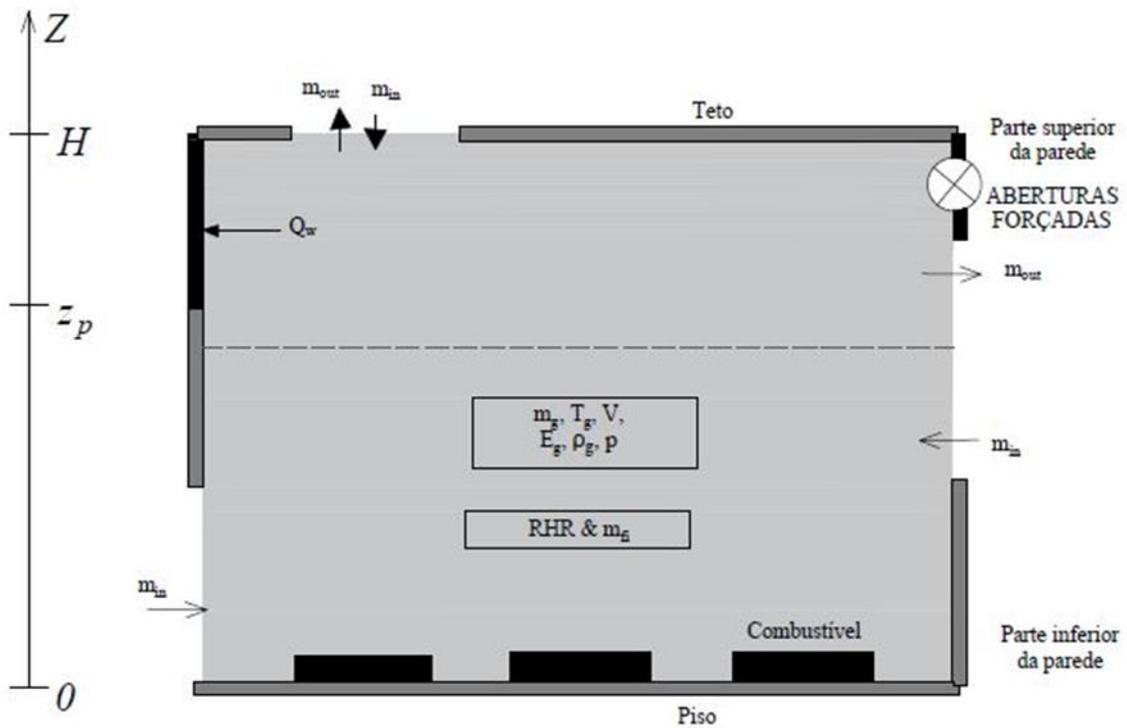


Fig. A2 Representação esquemática do modelo de uma zona e submodelos associados

A.1 Modelo de duas zonas

Os modelos de duas zonas são normalmente baseados em 11 variáveis físicas. Estas variáveis estão relacionadas com sete restrições e quatro equações diferenciais descrevendo os balanços de massa e energia em cada zona.

A integração no tempo dessas equações diferenciais permite calcular a evolução das variáveis caracterizando o gás em cada zona. A equação do balanço de massas expressa o facto de que, a qualquer momento, a variação de massa do gás da zona é igual à massa de gases de combustão gerada pelo incêndio, mais a massa que entra no compartimento através das aberturas subtraída da massa que sai do compartimento através das aberturas. A equação de balanço de energia expressa o facto de que a qualquer momento há um balanço entre, por um lado, a energia que é produzida no compartimento pela combustão e, por outro lado, a maneira com que essa energia é consumida; pelo aquecimento dos gases no compartimento, pela perda de massa do ar quente através das aberturas (incluindo um termo negativo para ter em conta a entrada de ar), pela perda de radiação através de aberturas e, finalmente, pelo aquecimento das divisórias. Tem de ser mencionado que o termo “divisória” é utilizado aqui para representar todas as superfícies sólidas de um compartimento fechado, nomeadamente as paredes verticais, o pavimento e o teto.

As onze variáveis que são consideradas para descrever o gás no compartimento são: m_U e m_L , a massa do gás da camada superior de gases quentes e inferior, respetivamente; T_U e T_L , as temperaturas do gás; V_U e V_L , os volumes; E_U e E_L , as energias internas; ρ_U e ρ_L , as densidades do gás da camada superior (U) e inferior (L) e finalmente p , a pressão absoluta no compartimento considerado como um todo.

As sete restrições são:

$$\begin{aligned}\rho_i &= \frac{m_i}{V_i} \\ E_i &= c_v(T) m_i T_i \\ p &= \rho_i R T_i \\ V &= V_U + V_L \\ i &= U, L\end{aligned}\tag{A.1}$$

com $c_v(T)$, o calor específico do gás no compartimento;

R , a constante universal do gás

i , igual a U para a camada superior e L para camada inferior

O calor específico do gás a volume constante e a pressão constante, a constante universal do gás R e o rácio de calor específico estão relacionadas com:

$$R = c_p(T_i) - c_v(T_i)\tag{A.2}$$

$$\gamma(T_i) = \frac{c_p(T_i)}{c_v(T_i)}$$

A variação do calor específico do gás com a temperatura é tida em conta através da seguinte relação:

$$c_p(T) = 0.187T + 952 [J/(kgK)] \quad (A.3)$$

Esta lei é obtida por uma regressão linear na lei ponto a ponto fornecida na NFPE *Handbook of Fire Protection Engineering*.

As equações de balanço de massa têm a forma geral das equações (A.4) e (A.5) em que o ponto na variável x significa a derivação de x com o tempo. As equações (A.4) e (A.5) definem que variação de massa gasosa em cada zona é feita das trocas de massa de uma zona com o fogo, com a outra zona, e com o ambiente exterior através dos diferentes tipos de aberturas (ver Anexo B).

$$\dot{m}_U = \dot{m}_{UVVout} + \dot{m}_{UHVin} + \dot{m}_{UHVout} + \dot{m}_{UFVin} + \dot{m}_{UFVout} + \dot{m}_e + \dot{m}_{fi} \quad (A.4)$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{UVVin} + \dot{m}_{LVVin} + \dot{m}_{LVVout} + \dot{m}_{LHVin} + \dot{m}_{LHVout} + \dot{m}_{LFFin} + \dot{m}_{LFFout} - \dot{m}_e \quad (A.5)$$

As equações do balanço de energia têm a forma geral das equações (A.6) e (A.7) definindo que a variação de energia em cada uma das zonas é feita das trocas de energia de uma zona com o fogo, com a outra zona, com as divisórias circundantes e com o ambiente exterior através das aberturas.

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{Urad} + \dot{q}_{Uwall} + \dot{q}_{UVVout} + \dot{q}_{UHVin} + \dot{q}_{UHVout} + \dot{q}_{UFVin} + \dot{q}_{UFVout} + c_p(T_L)\dot{m}_{ent}T_L + 0.7RHR \quad (A.6)$$

$$\dot{q}_L = \dot{q}_{Lrad} + \dot{q}_{Lwall} + \dot{q}_{UVVin} + \dot{q}_{LVVin} + \dot{q}_{LVVout} + \dot{q}_{LHVin} + \dot{q}_{LHVout} + \dot{q}_{LFFin} + \dot{q}_{LFFout} - \dot{q}_{ent} \quad (A.7)$$

Nestes balanços, a taxa de massa ou energia correspondendo a uma diminuição de massa ou energia no compartimento são negativos.

Têm de ser escolhidas quatro variáveis básicas para descrever o sistema. Desde que a temperatura das zonas T_U e T_L , a altura de separação das zonas Z_S e a diferença de pressão para o tempo inicial Δp são definidas, as equações (A.4) e (A.7) podem ser transformadas num sistema de equações diferenciais ordinárias (ODE) formado pelas equações (A.8) a (A.11). [FORNEY 1994]

$$\Delta p = \frac{(\gamma - 1)\dot{q}}{V} \quad (A.8)$$

$$T_U = \frac{1}{c_p(T_U)\rho_U V_U} (\dot{q}_U - c_p(T_U)m_U T_U + V_U \Delta p) \quad (A.9)$$

$$T_L = \frac{1}{c_p(T_L)\rho_L V_L} (\dot{q}_L - c_p(T_L)m_L T_L + V_L \Delta p) \quad (A.10)$$

$$\dot{Z}_S = \frac{1}{\gamma(T_L)PA_f} ((\gamma(T_L) - 1)\dot{q} - V_L \Delta p) \quad (A.11)$$

A.2 Modelo de uma zona

No caso do modelo de uma zona, o número de variáveis é reduzido para seis, descrevendo o gás no compartimento como um todo. i.e. m_g , a massa do gás; T_g a temperatura do gás; V , o volume do compartimento (constante); E_g a energia interna; p , a pressão no compartimento; ρ_g , a densidade do gás.

O número de restrições é reduzido para 4:

$$\begin{aligned}\rho_g &= \frac{m_g}{V} \\ E_g &= c_v(T_g)m_g T_g \\ p &= \rho_g R T_g \\ V &= const\end{aligned}\tag{A.12}$$

O balanço de massa é expresso agora pela equação (A.13):

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} + \dot{m}_{fi}\tag{A.13}$$

E o balanço de energia é expresso pela equação (A.14):

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{wall} + c_p(T_g)\dot{m}_{out}T_g + c_p(T_{out})\dot{m}_{in}T_{out} + RHR\tag{A.14}$$

Nestes balanços, a taxa de massa ou energia correspondente à diminuição de massa ou energia no compartimento são negativas.

Têm de ser escolhidas quatro variáveis básicas para descrever o sistema. Definida a temperatura da zona T e a diferença de pressão para o tempo inicial Δp , as equações (A.13) e (A.14) podem ser transformadas num sistema de equações diferenciais ordinárias formado pelas equações (A.15) e (A.16).

$$\Delta p = \frac{(\gamma - 1)\dot{q}}{V}\tag{A.15}$$

$$T_g = \frac{1}{c_p(T_g)\rho_g V}(\dot{q} - c_p(T_g)m_g T_g + V\Delta p)\tag{A.16}$$

A.3 Integração no tempo

Como mencionado, o sistema de equações (A.8) a (A.11) para modelos de duas zonas e as equações (A.15) e (A.16) para modelos de uma zona são resolvidas para se obter as características do gás das zonas no tempo. Estes sistemas de equações diferenciais ordinárias são rígidos. Uma física, embora não tão rigorosa do ponto de vista matemático, interpretação da rigidez é que a constante de tempo em relação à variação de pressão é muito menor que a constante de tempo da variação de temperatura. Por isso, é comum contar com um *solver* de biblioteca especializada especificamente escrito para este tipo de problema. No código do OZone é utilizado o *solver DEBDF*

A.4 Modelo de divisória

Normalmente os modelos de divisória de modelos de zona são baseados em diferenças finitas. Este método não permite resolver a equação implicitamente e, portanto, os modelos de zona e de divisória estão completamente associados. Este problema pode ser resolvido utilizando o método de elementos finitos e modificando a formulação de elementos finitos usual. Para respeitar totalmente o balanço de energia no caso do modelo de uma zona, as divisórias têm de ser modeladas por elementos finitos unidimensionais e no caso de modelos de duas zonas têm de ser modeladas por elementos finitos bidimensionais porque existem fluxos verticais nas divisórias verticais.

Mesmo que o OZone inclua duas zonas e uma zona, foi incluído um modelo de divisória unidimensional. Algum trabalho preliminar nos modelos de duas zonas com modelo de divisória bidimensional tem sido realizado e tem mostrado que o modelo de divisória baseado em elementos finitos unidimensionais é uma boa aproximação do baseado no bidimensional. Na maioria dos casos, os fenómenos bidimensionais são insignificantes. O aumento do tempo de computação e as dificuldades para definir o compartimento são bastante grandes e sem utilidade na maioria dos casos.

As divisórias podem ser divididas em três tipos: a divisória superior horizontal, o teto; a divisória inferior horizontal, o pavimento; e finalmente as divisórias verticais, as paredes. A formulação base de elementos finitos é a mesma para os três tipos de divisórias, mas as condições fronteira são diferentes.

A.4.1 Formulação do modelo de divisória

Uma divisória é discretizada por um modelo de elemento finito de dimensão única como representado na Figura A.3. Com esta discretização, a temperatura é calculada na interface entre as diferentes camadas, ou elementos, e a hipótese é baseada numa variação linear de temperatura na espessura de cada camada.

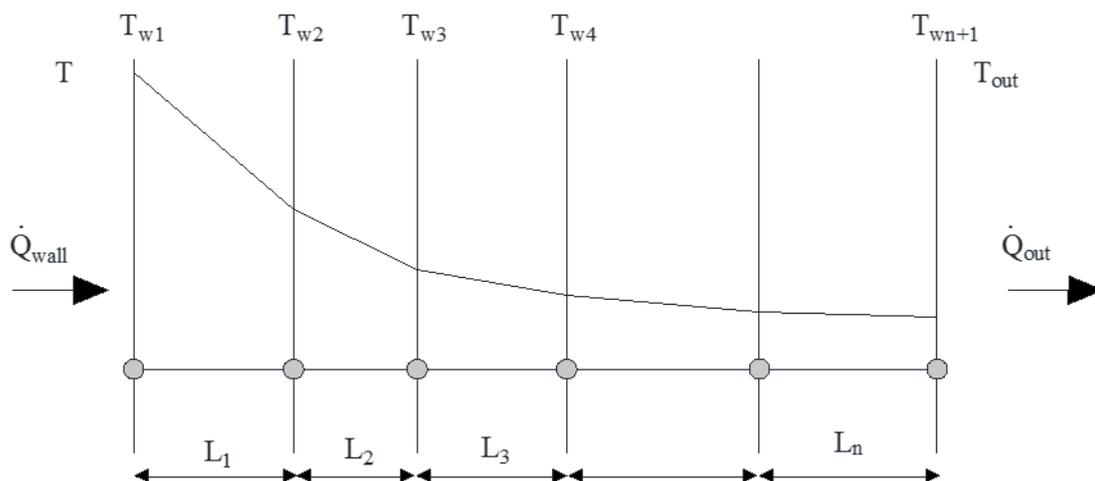


Fig. A3 Discretização unidimensional de elementos finitos de divisórias

Com a discretização e esta hipótese no campo de temperatura, o equilíbrio de cada elemento finito i é descrito pela equação seguinte:

$$[K_{el,i}] [T_{el,i}] + [C_{el,i}] [T_{el,i}] = [g_{el,i}] \quad (A.17)$$

com:

$$T_{el,i} = \begin{Bmatrix} T_{w,i} \\ T_{w,i+1} \end{Bmatrix} \quad (A.18)$$

$$K_{el,i} = \frac{k_i}{L_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.19)$$

$$C_{el,i} = c_i \rho_i L_i \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (A.20)$$

e

$$g_{el,1} = \begin{Bmatrix} \dot{q}_{wall} \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad g_{el,2} \text{ to } g_{el,n-1} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad g_{el,n} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{q}_{out} \end{Bmatrix} \quad (A.21)$$

As Equações A.12 e A.13 são de facto expressões simplificadas porque as características do material são consideradas como constantes em cada elemento, permitindo retirar as constantes a multiplicar para fora da matriz. A dependência da temperatura no elemento também pode ser tida em conta devido à bem conhecida técnica de integração numérica de Gauss. A equação A.20 é portanto a versão diagonalizável da matriz complexa, tendo o valor de 1/3 para os termos da diagonal e 1/6 para os termos fora da diagonal. A vantagem da forma diagonal é primeiro que suaviza as oscilações espaciais que poderiam surgir na solução se forem utilizados elementos muito espessos na discretização. Outra vantagem está relacionada com a estratégia de cálculo.

O conjunto de N equações do tipo (A.17) que pode ser reescrito para cada elemento finito N fazendo a divisória produzir o sistema de equações (A.22) em que a dimensão dos vetores é N+1 e (N+1) x (N+1) para as matrizes.

$$[K][T_w] + [C][T_w] = g \quad (A.22)$$

$$g = \begin{Bmatrix} \dot{q}_{wall} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dot{q}_{out} \end{Bmatrix} \quad (A.23)$$

A energia transmitida à interface da divisória resulta da transferência de calor por convecção e radiação entre as zonas e a divisória e entre o fogo e a divisória. A energia transmitida à interface entre o ambiente exterior e a divisória é devida à transferência de calor por convecção e radiação.

Note-se que T_{wl} é a temperatura da superfície interna da divisória e $T_{w,n+1}$ é a temperatura externa da superfície da divisória. T_z é a temperatura do gás da zona em contacto com a divisória na superfície interior, i.e. $T_z = T_U$ ou T_L no caso de 2ZM ou $T_z = T_g$ no caso de 1ZM.

Do sistema de equações (A.22), é bastante fácil obter o sistema de equações (A.24), calculado eficientemente devido à natureza diagonal de **C**.

$$[T_w] = [C]^{-1}(g - [K][T_w]) \quad (A.24)$$

Este sistema de equações é um conjunto de N equações diferenciais para as N temperaturas da divisória. A temperatura do compartimento apenas está presente no primeiro termo do vetor de carga, ver equações A.21 e A.23. Tem uma forma similar ao sistema de equações (A.8) a (A.11) (2ZM) e de equações (A.15) e (A.16) (1ZM) estabelecido para as variáveis das zonas do gás e pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\dot{T}_{w,1} = g_1(T, T_{w,1}, T_{w,2}), \dot{T}_{w,2} = g_2(T_{w,1}, T_{w,2}, T_{w,3}), \dot{T}_{w,N+1} = g_N(T_{w,N}, T_{w,N+1}, T_{out}) \quad (A.25)$$

A.4.2 Interação da zona com os modelos de divisória

Modelo de duas zonas

Nos modelos de duas zonas (2ZM), o teto está sempre associado à camada superior de gases quentes e o pavimento ao fogo e à camada inferior. As divisórias verticais são divididas em duas partes, uma superior, relacionada com a camada superior de gases quentes e uma inferior associada ao fogo e à camada inferior (Figura A.4). A área de cada parte é calculada por multiplicação do comprimento da parede pela sua altura que varia com o tempo e é função da altura de separação das zonas, Z_S . A área de aberturas incluída em cada divisória é subtraída. A discretização de elementos finitos das duas partes é idêntica, apenas as condições fronteira são diferentes.

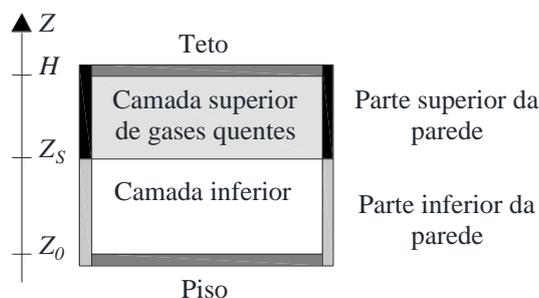


Fig. A4 Modelo de duas zonas

O sistema de equações (A.24) tem de ser construído uma vez para o teto e uma vez para o piso. Se o recinto tiver M diferentes tipos de paredes, tem de ser construído $2M$ de vezes. Se $N_{eq,c}$ e $N_{eq,f}$ o número de nó do teto e do piso, e $N_{eq,i}$ o número de nó da parede $n^\circ i$, o conjunto total de equações da divisória contém $N_{eq,w}$ equações diferenciais, dadas pela equação (A.26).

$$N_{eq,w} = N_{eq,f} + N_{eq,c} + \sum_{i=1}^M 2N_{eq,i} \quad (A.26)$$

As equações (A.8) a (A.11) e as equações (A.24) formam um conjunto de $N_{eq,w} + 4$ equações diferenciais que podem ser passadas para um solucionador numérico. O solucionador numérico irá integrar as equações tendo em conta a conexão entre o compartimento e a divisória e resolver $N_{eq,w} + 4$ variáveis que são a variação de pressão, a temperatura da zona superior, a temperatura da zona inferior e a altura da zona da interface, mais as temperaturas em cada nó das divisórias.

Utilizar um modelo de divisória unidimensional no modelo de duas zonas leva a criar ou suprimir artificialmente alguma energia na parede. Considerando uma espessura crescente da camada superior de gases quentes (Figura 5), se a altura de separação entre as zonas é Z_S no tempo t e $Z_S + \Delta Z_S$ no tempo $t + \Delta t$, uma parede de altura ΔZ_S é transformada de parede inferior para parede superior. Como a temperatura da parte inferior das paredes é geralmente mais baixa que a da parte superior, alguma energia é criada. Caso contrário se a espessura da camada superior de gases quentes diminuir, alguma energia é perdida. A única forma para ser rigoroso quando se modela paredes em 2ZM, é fazer um modelo de divisória bidimensional que terá em conta os fluxos verticais. A variação de Z_S tem de ser levada em conta nas condições fronteira dos elementos bidimensionais.

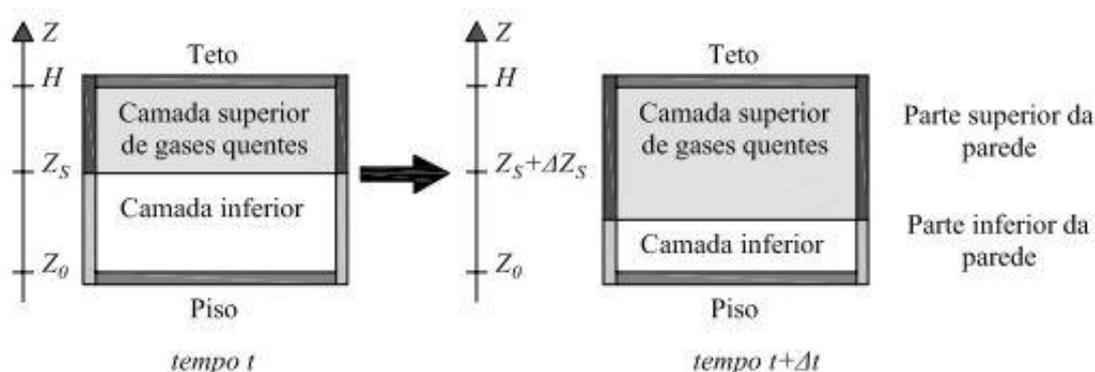


Fig. A5 Parte superior e inferior de uma parede num modelo duas zonas

Condições fronteira

Para todos os tipos de divisórias, a energia transmitida na interface entre o ambiente exterior e a divisória é devida à transferência de calor por convecção e radiação e dada pela equação (A.27).

$$\dot{q}_{pout} = h(T_{out} - T_{wN+1}) + \varepsilon\sigma(T_{out}^4 - T_{wN+1}^4) \quad (A.27)$$

A camada superior de gases quentes é composta de uma mistura de produtos de combustão e ar fresco entrando da pluma da camada inferior. É considerada como sendo opaca e a radiação entre as divisórias conectadas a ela é ignorada. A energia transmitida entre as superfícies interiores da divisória superior e a camada superior de gases quentes resulta da transferência de calor por convecção e radiação.

$$\dot{q}_{wall,U} = h(T_U - T_{w1}) + \varepsilon\sigma(T_U^4 - T_{w1}^4) \quad (A.28)$$

A camada inferior é composta essencialmente de ar fresco com apenas alguns produtos de combustão, então a emissividade relativa é considerada nula. A energia transmitida entre as superfícies interiores das divisórias inferiores e a camada inferior resulta apenas da transferência de calor por convecção. A radiação proveniente do incêndio é representada pelo termo $q_{fi,w}$.

$$\dot{q}_{wall,L} = h(T_L - T_{w1}) + q_{fi,w} \quad (A.29)$$

$q_{fi,w}$ [W/m²] é obtido dividindo-se 30% da taxa de libertação de calor pela área total da divisória inferior, incluindo a área aberta.

Modelo de uma zona

Quando se considera um modelo de uma zona durante toda a simulação, a divisória vertical é dividida em duas partes associada a uma única zona (Figura A.6). A malha de elementos finitos das duas partes e as condições fronteira são idênticas. Portanto, a distribuição de temperaturas nas divisórias e as densidades do fluxo nas fronteiras são as mesmas nas duas partes. Assim num modelo de uma zona uma parede vertical não é normalmente dividida em duas partes. Os resultados obtidos com modelos de divisória de duas zonas para uma parede única são idênticos assim eles podem ser obtidos com apenas um modelo de uma divisória para a mesma parede única. As consequências deste procedimento é apenas aumentar o número de equações a ser resolvido e, portanto, o tempo de cálculo. De qualquer forma isto foi realizado de forma a permitir a combinação entre 2ZM e 1ZM.

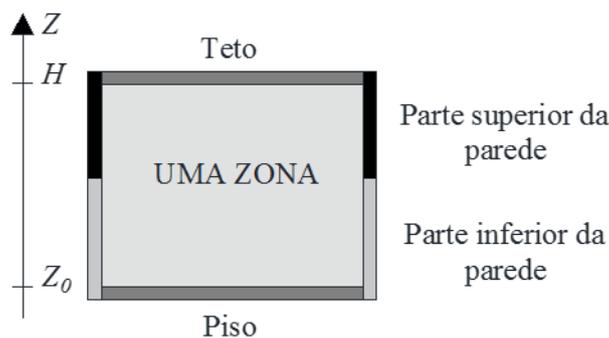


Fig. A6 Modelo de uma zona

No modelo de uma zona, o sistema de equações (A.24) tem de ser construído uma vez para o teto e uma vez para o piso. Se o compartimento tem M diferentes tipos de parede, tem de ser construído $2M$ de vezes. Se $N_{eq,c}$ e $N_{eq,f}$ o número de nó do teto e do piso, e $N_{eq,i}$ o número de nó da parede $n^{\circ}i$, o conjunto total de equações de divisória contem $N_{eq,w}$ equações diferenciais, dadas pela equação (A.26).

As equações (A.15), (A.16) e as equações (A.24) construídas $N_{eq,w}$ de vezes formam um conjunto de $N_{eq,w}+2$ equações diferenciais que podem ser passadas para um solucionador numérico. O solucionador numérico vai integrar as equações tendo em conta a relação entre o compartimento e as divisórias e irá resolver as $N_{eq,w}+2$ variáveis que são a variação de pressão e a temperatura no compartimento, mais as temperaturas em cada nó das divisórias.

Para 1ZM, se considerarmos que o procedimento usual define os limites do compartimento na superfície interna da parede e acrescenta um submodelo de parede no topo, o procedimento proposto equivale, de facto, a definir o limite do compartimento na superfície exterior da parede. Porque todas as equações são resolvidas simultaneamente com um procedimento implícito, o balanço de energia entre o gás e a parede é totalmente respeitado.

Condições fronteira

Para os três tipos de divisórias, a energia transmitida na interface entre o ambiente exterior e a divisória é devida à transferência de calor por convecção e radiação e é dada pela equação (A.30).

$$\dot{q}_{pout} = h(T_{out} - T_{wN+1}) + \varepsilon\sigma(T_{out}^4 - T_{wN+1}^4) \quad (A.30)$$

A energia transmitida nas interfaces da divisória interna resulta da transferência de calor por convecção e radiação entre a zona e as divisórias.

$$\dot{q}_{wall} = h(T_g - T_{w1}) + \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_{w1}^4) \quad (A.31)$$

A.5 Troca de modelo de duas zonas para uma zona

Se alguns critérios forem atingidos durante a simulação de duas zonas, o código irá automaticamente trocar para simulação de uma zona, que se ajusta melhor à situação no interior do compartimento no momento. A simulação irá continuar até ao fim do incêndio considerando um modelo de uma zona. O critério de transição será explicado no Anexo F. O objetivo deste parágrafo é definir como o OZone aborda as variáveis básicas dos modelos de zona, como define as condições iniciais de uma zona e como aborda os modelos de divisória.

Formulação dos modelos de zona

O tempo em que a troca de 2ZM para 1ZM ocorre é t_s . O valor das 11 variáveis básicas que descrevem o gás nas duas zonas é conhecido até t_s graças à integração no tempo das equações (A.8) a (A.11) e considerando as restrições (A.1). Para continuar a simulação com um modelo de uma zona, é possível começando por resolver as equações (A.15) e (A.16) associadas às condições iniciais que representem a situação naquele momento. O ponto é definir os valores iniciais de 1ZM (no tempo t_s).

No modelo de uma zona há seis variáveis para descrever o gás no compartimento como um todo, relacionadas com quatro restrições. São necessárias duas novas restrições para definir as novas condições iniciais.

Obtém-se estas duas condições adicionais definindo-se que durante a transição de 2 zonas para 1 zona, o total de massa de gás e o total de energia no compartimento são conservadas.

$$m_g(t_s) = m_U(t_s) + m_L(t_s) \quad (\text{A.32})$$

$$E_g(t_s) = E_U(t_s) + E_L(t_s) \quad (\text{A.33})$$

A temperatura de uma zona inicial (no tempo t_s) $T_g(t_s)$ e a pressão de uma zona $p(t_s)$ pode ser deduzida através das equações (A.32), (A.33) e (A.12).

Depois o modelo de uma zona corre com os submodelos associados para calcular as trocas de energia e massa através das aberturas. A formulação dos modelos de divisória e os seus valores iniciais são explicados no Anexo F.

Formulação do modelo de parede

As temperaturas das divisórias no tempo t_s são obtidas por integração do conjunto de equações (A.24) associadas às equações básicas de 2 zonas (A.8) a (A.11). Nesse tempo, a altura das paredes inferiores e superiores (divisórias verticais) são respetivamente $Z_S(t_s)$ e $H-Z_S(t_s)$. Desde o tempo de transição t_s até ao fim do cálculo o modelo de uma zona está associado às paredes inferiores e superiores que mantém a dimensão que tinham no tempo t_s i.e. $Z_S(t_s)$ e $H-Z_S(t_s)$. Durante a transição não é feita nenhuma modificação das temperaturas da divisória da dimensão, apenas as condições fronteira são modificadas. Isto permite respeitar completamente a conservação de energia durante a transição de modelo de duas zonas para uma zona.

Se for definido um modelo de uma zona desde o início do cálculo, a dimensão superior e inferior das paredes são as dimensões iniciais, deduzida da altura inicial de separação de zonas, até ao fim do cálculo.

Isto significa que durante a simulação de uma zona (uma zona bem como a estratégia de combinação) uma parede é representada por duas divisórias idênticas que veem as mesmas condições fronteira a cada momento.

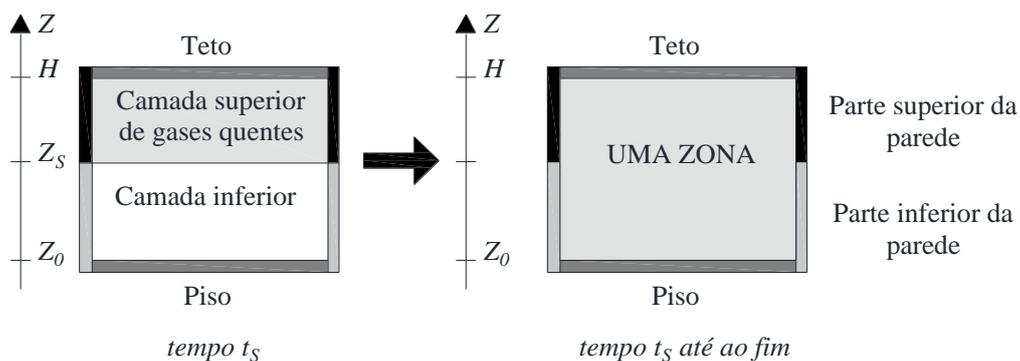


Figure A7 Troca de modelo de duas zonas para modelo de uma zona

Com um modelo de duas zonas, a parte inferior das paredes são aquecidas diretamente por radiação proveniente do incêndio, e elas reenviam energia para a camada inferior por convecção. Se a troca for atingida, elas trocam energia por radiação e convecção com a única zona.

ANEXO B – TROCAS ATRAVÉS DE ABERTURAS

No OZone estão introduzidos três modelos de aberturas: aberturas verticais, aberturas horizontais e aberturas forçadas.

B.1 Aberturas verticais (em paredes)

B.1.1 Trocas convectivas

O fluxo de massa através das aberturas é calculado através da integração da lei de Bernoulli em cada abertura.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{m}_{\alpha, \nu\nu, \beta} = Kb(T \text{ or } t) \int_{Z'}^{Z''} \frac{P_A(z)}{RT_A} \sqrt{2RT_A \left(1 - \frac{P_B(z)}{P_A(z)} \right)} dz \quad (\text{B.2})$$

com: subíndice A: variável na origem do fluxo;

subíndice B: variável no destino do fluxo;

Z' e Z'' : limites de integração à altura Z ;

b : largura da abertura vertical;

α : U se a integração é feita na camada superior de gases quentes, L se a integração é feita na camada inferior e g no caso de modelo de uma zona;

β : in se o gás entrar no compartimento, out se gás sair do compartimento

Se a altura onde a pressão no interior do compartimento é igual à pressão no exterior do compartimento coincidir com uma abertura vertical, as aberturas verticais são divididas em duas partes, uma onde o fluxo de massa entra no compartimento e outra onde o fluxo sai do compartimento. Esta altura é conhecida como altura do plano neutro. Além disso num modelo de duas zonas, se a altura de separação entre as zonas coincidir com a altura da abertura, é definida uma outra subdivisão de duas partes. No 1ZM (Modelo de Uma Zona), existe três possibilidades seguindo a posição do nível neutro. No 2ZM (Modelo de Duas Zonas), existe 10 possibilidades seguindo a posição do nível neutro e as posições de altitude de separação de zona. Para cada abertura vertical, a equação B.1 é calculada 1 ou 3 vezes com os limites de integração em altura apropriados (Z' & Z'' pode ser a altura do peitoril da abertura, a altura superior do vão, a altura do plano neutro ou a altura de separação entre zonas). A Figura B.1 representa para um modelo e duas zonas e para um modelo de uma zona uma possível situação para a posição relativa de Z_{sill} , Z_P , Z_S e Z_{soffit} .

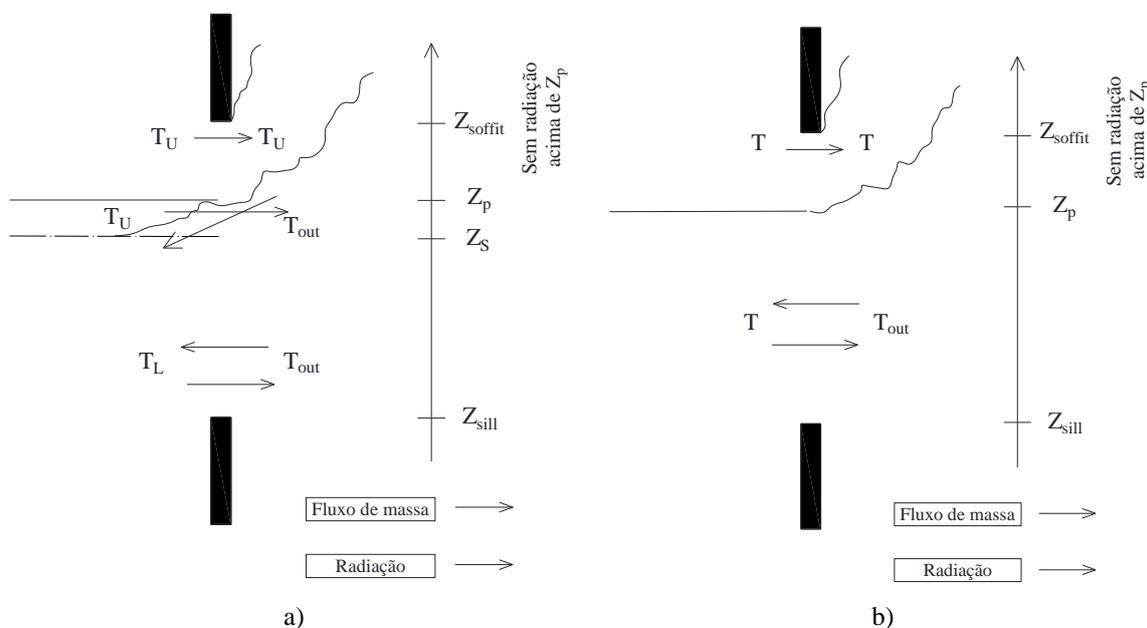


Fig. B1 Trocas através de aberturas verticais em (a) 2ZM e (b) 1ZM

B.1.2 Trocas de radiação

A radiação através das janelas é tida em conta pela lei de Stefan-Boltzmann. Esta lei considera que a radiação apenas existe abaixo da altura onde a pressão no interior do compartimento é igual à pressão no exterior do compartimento. Acima deste nível os gases saem do compartimento e a temperatura no exterior (na pluma) assume-se ser igual à temperatura no compartimento e assim é considerado que o fluxo de radiação efetivo é igual a zero (Figura B.2).

Se a janela estiver fechada não existem trocas de massa através dela. O envidraçado pode ser considerado como adiabático e não se considera radiação através dele. Se for considerado que existe radiação através da janela, é avaliada através da lei de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q}_{gl,rad} = \epsilon_{gl}^* \sigma (T_Z^4 - T_{out}^4) \tag{B.2}$$

em que ϵ_{gl}^* é um parâmetro que inclui as emissividades relativas dos vidros e inclui também a parte da energia que é refletida nas interfaces entre gás e vidro e absorvida pelo material envidraçado; este parâmetro é altamente dependente da natureza do material do envidraçado.

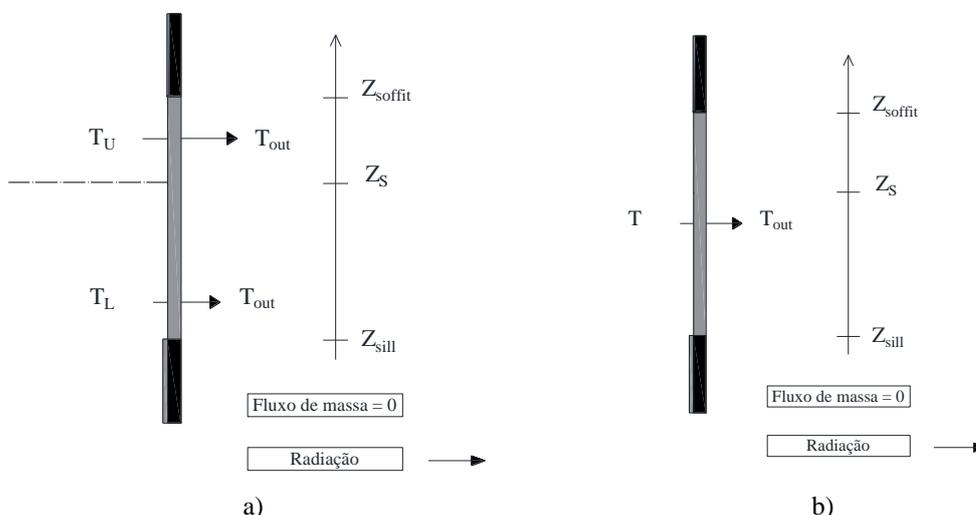


Fig. B2 Trocas de radiação através de aberturas verticais fechadas em (a) 2ZM e (b) 1ZM

B.2 Aberturas horizontais (no teto)

O fluxo de gás através de uma abertura horizontal no teto não é sempre regido pela simples diferença de pressão, a flutuação pode também ter um efeito significativo. Estas forças podem levar a trocas de fluxos bidirecionais através das aberturas. Para além disso não é apropriado utilizar incondicionalmente a equação de Bernoulli para simular o fluxo através de aberturas horizontais.

Cooper estabeleceu um moledo para calcular fluxos através de aberturas circulares, profundas (i.e. pequena relação profundidade-diâmetro) e horizontais. Este modelo calcula o fluxo considerando as forças acionadas por pressão e quando apropriado combina os efeitos de pressão e flutuação. O modelo de Cooper é descrito em [COOPER 96], [COOPER 97].

B.3 Aberturas forçadas (extratores de fumo)

O modelo de ventilação forçada é construído para representar o efeito da ventilação mecânica. As aberturas forçadas são definidas pelo volume da taxa de fluxo que elas induzem, V_{FV} , a sua altura Z_{FV} e o seu diâmetro D_{FV} .

Quando a zona de interface está acima da elevação da abertura forçada $+ 1.5 D_{FV}$, o gás extraído é apenas o ar da camada inferior. Quando a zona de interface está abaixo da elevação da ventilação forçada $- 1.5 D_{FV}$, o gás extraído é apenas o ar da camada superior. Quando a zona de interface está entre $Z_S + 1.5 D_{FV}$ e $Z_S - 1.5 D_{FV}$, a massa de ar extraído de cada camada é proporcional à distância entre Z_S e Z_{FV} e $3D_{FV}$.

Se a abertura forçada estiver no teto é feita uma interpolação. Quando a zona de interface está acima da elevação da abertura forçada $- D_{FV}$, o gás extraído é apenas o gás da camada inferior. Quando a zona de interface está abaixo da elevação da abertura forçada $- 2D_{FV}$, o gás extraído é apenas o da camada superior. Quando a altura da interface está entre $Z_S - D_{FV}$ e $Z_S - 2D_{FV}$, a massa de ar extraída de cada camada é proporcional à distância entre Z_S e $Z_{FV} - D_{FV}$ e $2D_{FV}$.

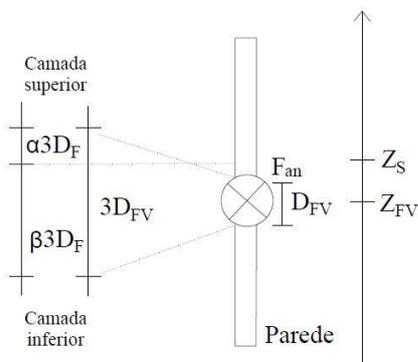


Fig. B.3 Ventilação forçada na parede

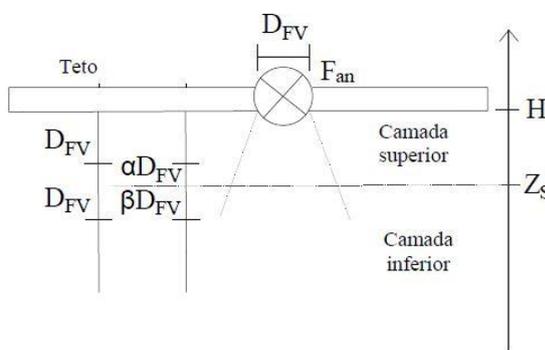


Fig. B.4 Ventilação forçada no teto

ANEXO C - MODELOS DE COMBUSTÃO

C.1 Sem modelo de combustão

A taxa de pirólise e a taxa de libertação de calor definida nos dados são consideradas nos balanços de massa e energia. Nenhum controle pela ventilação será utilizado. A cada tempo, as equações seguintes serão satisfeitas:

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_{f,data}(t) \quad (C.1)$$

$$RHR(t) = RHR_{data}(t)$$

Este caso corresponde à simulação de testes onde a perda de massa e a taxa de libertação de calor foi medida. Também serve para situações onde a taxa de pirólise é conhecida e quando se assume que o incêndio é controlado pelo combustível.

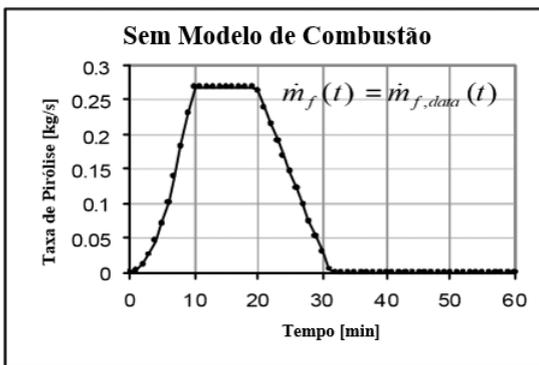


Fig. C1 Curva da taxa de pirólise

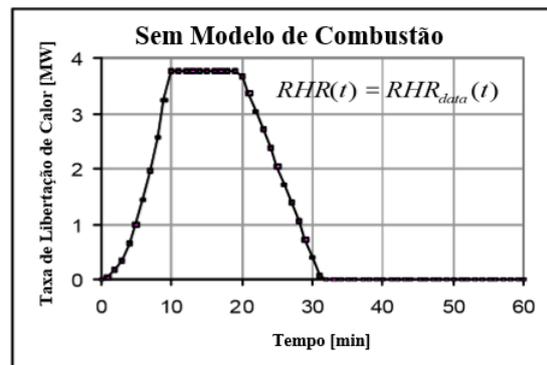


Fig. C2 Curva da taxa de libertação de calor

C.2 Modelo de combustão de chama externa

Neste modelo é assumida a combustão externa e toda a carga de incêndio é transformada em gases no compartimento, mas apenas uma parte fornece energia para o compartimento. A taxa de libertação de calor do incêndio pode ser limitada pela quantidade de oxigênio disponível no compartimento, enquanto a taxa de pirólise permanece inalterada.

Quando a massa de oxigênio no compartimento é maior que 0 kg, o incêndio é controlado pelo combustível e toda a perda de massa do combustível fornece energia ao compartimento:

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_{f,data}(t) \quad (C.2)$$

$$RHR(t) = RHR_{data}(t) = \dot{m}_f(t) H_{f,eff}$$

Se todo o oxigênio no compartimento é consumido, o incêndio é controlado pela ventilação e a combustão não é completa. A energia libertada é regida pela massa de oxigênio que entra no compartimento através das aberturas:

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_{f,data}(t) \quad (C.3)$$

$$RHR(t) = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1.27} H_{f,eff}$$

Quando passa a existir de novo oxigénio disponível no compartimento, o fogo passa de novo ao regime de controlado pelo combustível e a equação C.4 define a taxa de pirólise e taxa de libertação de calor.

$$H_{ceff}(t) = \frac{RHR(t)}{\dot{m}_{f_i}(t)} \tag{C.4}$$

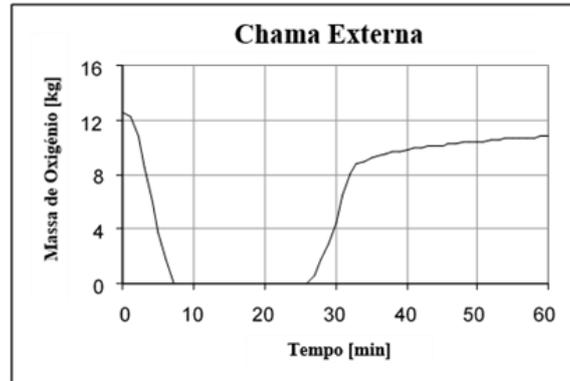


Fig. C3 Curva da massa de oxigénio

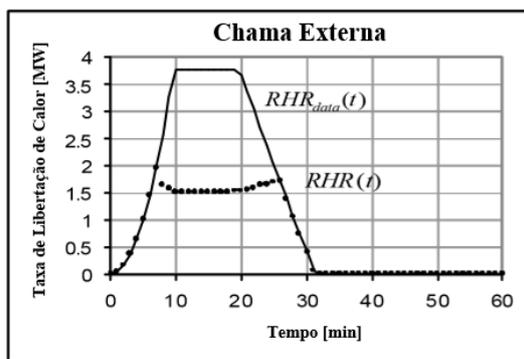


Fig. C.4 Curva da taxa de libertação de calor

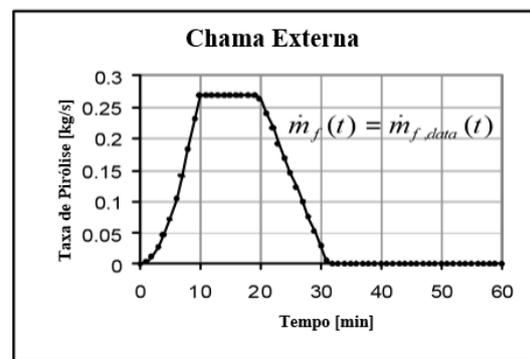


Fig. C.5 Curva da taxa de pirólise

C.3 Modelo de combustão de duração alargada do incêndio

Este modelo supõe que a libertação de massa pode ser limitada pela quantidade de oxigénio disponível no compartimento. A massa total de combustível arde no interior do compartimento (procedimento seguro) e, em seguida, a duração do incêndio é aumentada comparada com a duração definida inicialmente.

Quando a massa de oxigénio no compartimento é maior que 0 kg, o incêndio é controlado pelo combustível e toda a perda de massa do combustível fornece energia ao compartimento:

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_{f,data}(t) \tag{C.5}$$

$$RHR(t) = RHR_{data}(t) = \dot{m}_f(t)H_{f,eff}$$

Se a massa de oxigénio no compartimento é 0 kg, o incêndio é controlado pela ventilação. Neste caso, a massa perdida pelo incêndio é regida pela massa de oxigénio no compartimento e toda a massa de pirólise é transformada em energia:

$$\dot{m}_f(t) = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1.27} \tag{C.6}$$

$$RHR(t) = \dot{m}_f(t)H_{f,eff} = \frac{\dot{m}_{ox,in}(t)}{1.27} H_{f,eff}$$

A fase decrescente linear começa quando 70 % do total da carga de incêndio é consumida.

Neste modelo não é assumida combustão externa, toda a carga de incêndio fornece a sua energia para o compartimento. Se o fogo é controlado pela ventilação, a taxa de pirólise é proporcional ao oxigénio que entra no compartimento. Este modelo não é um modelo físico porque a pirólise não é diretamente dependente da concentração de oxigénio. Foi estabelecido para procedimentos de cálculo, de forma a evitar incertezas na taxa de pirólise máxima por unidade de área de pavimento e assim está do lado da segurança relativamente à duração do incêndio.

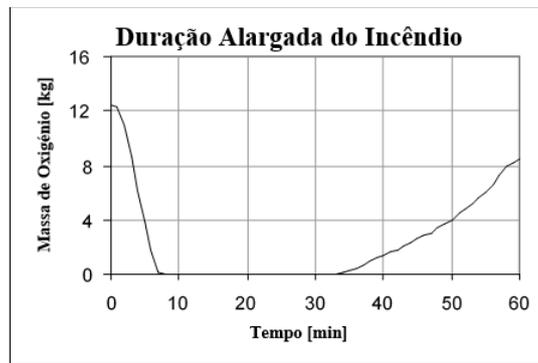


Fig. C6 Curva da massa de oxigénio

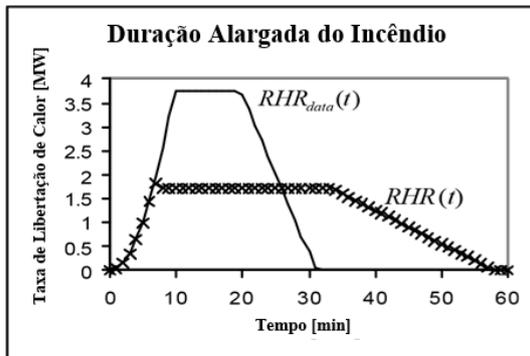


Fig. C.7 Curva da taxa de libertação de calor

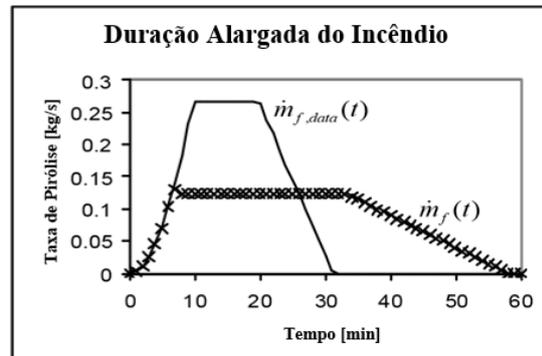


Fig. C.8 Curva da taxa de pirólise

ANNEX D – ANEXOS NACIONAIS E PARÂMETROS NACIONAIS PARA APLICAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL EM DIFERENTES PAÍSES EUROPEUS NO PROGRAMA OZONE

Vários anexos nacionais da EN 1991-1-2 estão introduzidos no OZone. Por comparação do método de cálculo aplicável a cada país com o método original descrito nos Eurocódigos, observam-se três opções diferentes:

- O valor dos fatores envolvidos no cálculo da densidade da carga de incêndio de cálculo bem como o procedimento de cálculo é alterado;
- Apenas os valores relacionados com o cálculo da densidade de carga de incêndio são alterados;
- Não há alterações no procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio de cálculo.

Note-se que a Dinamarca não permite utilizar o Anexo E da EN 1991-1-2 mas não é proposto outro método de cálculo no Anexo Nacional Dinamarquês. Este país é uma exceção.

Na Holanda, o método é bastante similar ao da Alemanha. Contudo, é de salientar que os dois fatores parciais de segurança aplicados à densidade de carga de incêndio e à Taxa de Libertação de Calor são idênticos.

No Reino Unido, algumas fórmulas diferem ligeiramente, mas o método é o mesmo que o do Eurocódigo.

Um vasto conjunto de países seguem o método de cálculo descrito na EN 1991-1-2 mas os valores de vários parâmetros são diferentes. Por exemplo:

- A Alemanha e a França utilizam o quantilho de 90 % (em vez de 80 %), conseqüentemente as densidades de carga de incêndio são diferentes;
- Alguns países optaram por considerar diferentes densidades de carga de incêndio para várias ocupações (independentemente da escolha da do quantilho);
- França e Portugal optaram por considerar todos os fatores delta relacionados com medidas ativas de combate a incêndio iguais a 1;
- A Bélgica, a Espanha e Itália utilizam outros valores para os fatores delta relacionados com medidas ativas.

Um grande número de países optou por seguir o método do Eurocódigo sem nenhuma alteração dos valores dos fatores que influenciam a densidade de carga de incêndio, como a Eslováquia, Eslovênia, Estónia, Hungria, Luxemburgo, Polónia, República Checa e Roménia.

Seguidamente são indicados os parâmetros nacionais para aplicação de Incêndios Naturais em diferentes países europeus.

Alemanha

O procedimento de cálculo fornecido no Anexo Nacional alemão da EN 1991-1-2 é diferente da abordagem da EN. O EC e o DIN EN têm a mesma abordagem probabilística, mas os parâmetros resultantes dos trabalhos de investigação deles são diferentes.

O risco de ativação de incêndio na DIN EN é dado por:

$$P_{fi} = P_1 \times P_2 \times P_3 \times A_{fi}$$

em que:

P1: probabilidade de um incêndio muito severo não ser parado pelos ocupantes de acordo com a categoria do edifício

P2: fator de redução dependente do tipo de brigada de combate a incêndio e do tempo entre o alarme e a intervenção da brigada

P3: fator de redução se existirem os sistemas de detecção automática de incêndio (por fumo ou calor), transmissão automática do alarme ou sistemas *sprinkler*

O fator de segurança na EN (aplicado à densidade de carga de incêndio) é calculado como o produto dos fatores delta, enquanto que no Anexo Alemão os fatores de segurança (dois fatores diferentes aplicados à RHR e à densidade de carga de incêndio) têm de ser explicitamente calculado pela fórmula probabilística:

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot \left[0,5772 + \ln(-\ln(\Phi(\alpha \cdot \beta_{fi}))) \right]}{1 - V \cdot \sqrt{6} / \pi \cdot \left[0,5772 + \ln(-\ln(0,9)) \right]}$$

Também, a Tabela D.1, que apresenta os valores das densidades de carga de incêndio para diferentes ocupações é alterada. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional Alemão são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D1: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (Alemanha)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 90%	Taxa de crescimento de incêndio	RHRf
Habitação	1085	Média	250
Escritório	584	Média	250
Hospital (Quarto)	320	Média	250
Hotel (Quarto)	431	Média	250
Biblioteca	2087	Média	250 ou 500
Escola	397	Média	150
Centro comercial	835	Rápida	250
Teatro, cinema	417	Rápida	500
Transporte (espaço público)	139	Lenta	250

O procedimento no programa OZone envolve primeiro a definição da geometria do compartimento (dimensões, tipo de divisórias, aberturas, sistemas de evacuação de fumos,...) no módulo comum do OZone. A diferença ao outro procedimento é que, depois de selecionar “Alemanha” na lista de Anexos Nacionais, na janela devem ser definidos os valores apropriados de entrada de dados.

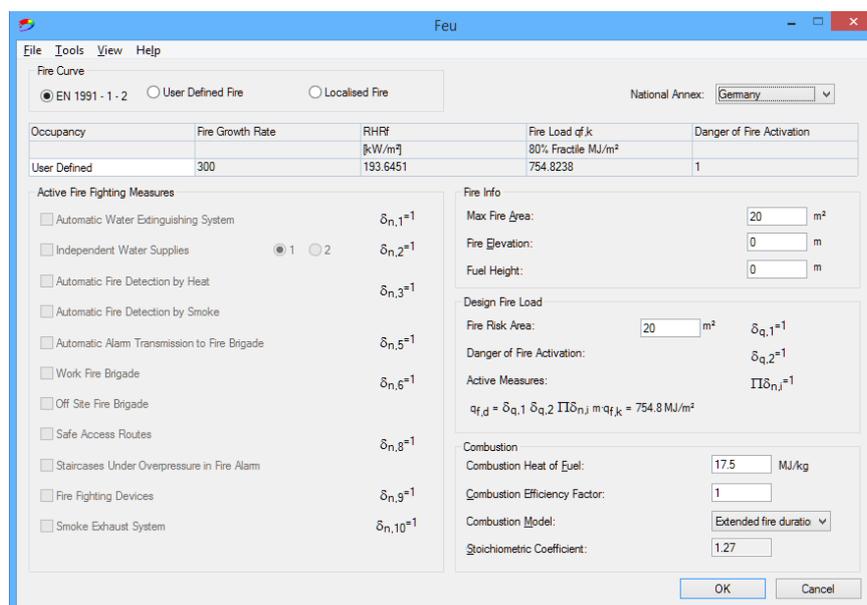


Fig. D1: Parâmetros gerais para aplicação do Anexo Nacional Alemão

Na janela principal “Definição do Incêndio”, a Taxa de Crescimento do Incêndio, a RHR_f e a q_{fk} são automaticamente calculadas. Também, selecionando a DIN EN, os três fatores que multiplicam q_{fk} da EN são automaticamente definidos como 1.0 no OZone.

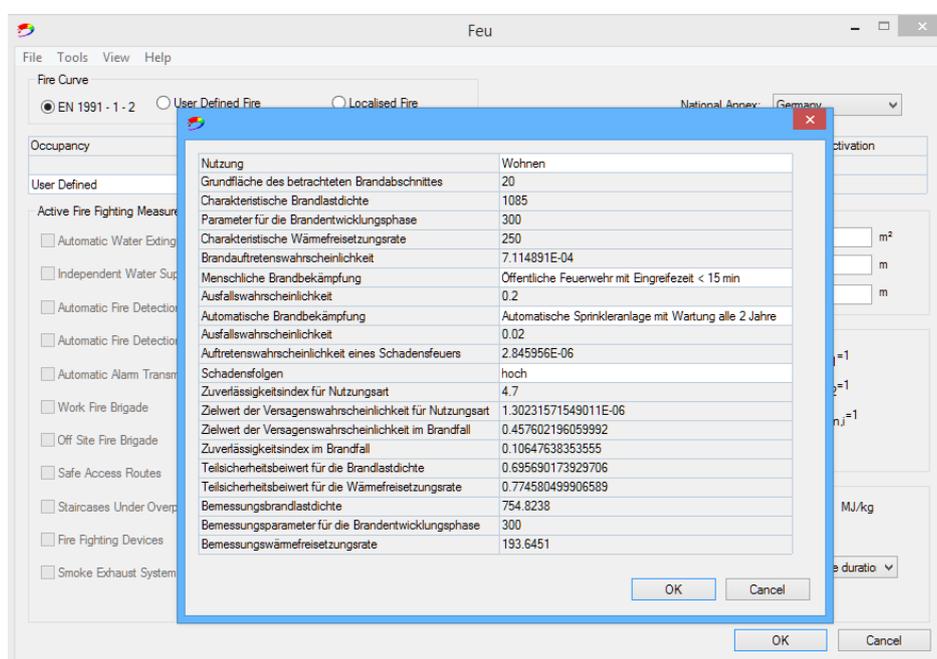


Fig. D2: Parâmetros específicos do Anexo Nacional Alemão

Depois, o cálculo com o OZone é realizado como de costume de forma a obter-se a curva de temperatura para fins de cálculo.

Bélgica

Não são indicadas alterações ao procedimento de cálculo no Anexo Nacional Belga da EN 1991-1-2.

Para a Tabela D.2, os valores para os fatores que têm em conta o risco de ativação de incêndio devido à dimensão do compartimento são substituídos por uma fórmula para áreas entre 25-2500 m². A descrição das ocupações também é alargada.

Na Tabela D.3, alguns fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas de combate a incêndio são modificados.

Na Tabela D.4, os quartos de hotel e hospital são considerados com a mesma densidade de carga de incêndio e são consideradas algumas disposições suplementares no caso de incêndios localizados.

Os valores implementados para o Anexo Nacional Belga no programa OZone são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D2: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (Bélgica)

Área do piso do compartimento Af [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupações
25	$\delta_{q1} = 1,1 + 0,4 \log_{10} (Af / 25)$	0.78	Galeria de arte, museu, piscina
250		1	Escritórios, residências, hotéis, indústrias que lidam com baixa inflamabilidade (produtos de betão, aço, indústria de papel), hospitais, escolas, lojas, salas de restaurantes, espaços públicos, estacionamentos
2500		1.22	Fabricas de máquinas e motores, indústrias que lidam com materiais inflamáveis (serralharia, carpintaria, têxtil), cozinhas coletivas
5000	2	1.44	Laboratório químico, atelier de pintura
10000	2.13	1.66	Fábrica de pirotecnia ou tintas

Tabela D3: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (Bélgica)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	0.61 ou 0.78(industrial)
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1.0/0.95/0.91
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Deteção e alarme automático de incêndio (por Calor/ por Fumo)	0.87 ou 0.73
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	0.87
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros fora do local	0.78 ou 1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1 ou 1.5
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndios	1 ou 1.5
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1 ou 1.5

Tabela D4: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (Bélgica)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 80%	Taxa de crescimento do incêndio	RHRf*
Habitação	948	Média	250
Quarto de hotel ou hospital	377	Média	250
Biblioteca	1824	Rápida	500
Escritório	511	Média	250
Sala de aulas	347	Média	250
Centro comercial	730	Rápida	250
Teatro (cinema)	365	Rápida	500
Transporte de pessoas (espaços públicos)	122	Lenta	250

* “para os fogos localizados, considerar no mínimo $RHR_f = 500\text{kW/m}^2$ para todos os tipos de ocupação”

Croácia

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional da Croácia da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional da Croácia são os da EN 1991-1-2.

Eslovénia

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional da Eslovénia da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional Eslovaco são os da EN 1991-1-2.

Espanha

Não são indicadas alterações ao procedimento de cálculo no Anexo Nacional Espanhol da EN 1991-1-2.

Para a Tabela D.5, a descrição das ocupações é alargada e são fornecidos valores diferentes para o coeficiente de perigo de ativação do incêndio.

Na Tabela D.6, apenas os fatores relacionados com Sistema Automático de Extinção com Água, Detecção Automática de Incêndio & Alarme (por Calor/ por Fumo) e para a Transmissão Automática de Incêndio de Alarme aos Bombeiros são considerados.

Na Tabela D.7, algumas densidades de carga de incêndio são modificadas.

Os valores a serem implementados para o Anexo Nacional Espanhol no programa OZone são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D5: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (Espanha)

Área do piso do compartimento A_f [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupações
25	1.1	0.78	Galeria de arte, museu, piscina
250	1.5	1.25	Habitação, administrativo, residencial, pedagógica
2500	1.9	1.25	Setores de risco especial baixo
5000	2	1.4	Setores de risco especial médio
10000	2.13	1.6	Setores de risco especial alto

Tabela D6: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (Espanha)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	0.61
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Detecção e alarme automáticos de incêndio (por Calor/ por Fumo)	0.87
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	0.87
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros for a do local	1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndios	1
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1

Tabela D7: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (Espanha)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 80%	Taxa de crescimento do incêndio	RHRf
Habitação	650	Média	250
Hospital (quarto)	280	Média	250
Hotel (quarto)	280	Média	250
Biblioteca	1824	Rápida	500
Escritório	520	Média	250
Sala de aula	350	Média	250
Centro comercial	730	Rápida	250
Teatro (cinema)	365	Rápida	500
Transporte (espaço público)	122	Lenta	250

Estónia

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional da Estónia da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional da Estónia são os da EN 1991-1-2.

França

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo no Anexo Nacional Francês da EN 1991-1-2, mas os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio são modificados.

De facto, todos os valores para os fatores que têm em conta o risco de ativação de incêndio devido à dimensão do compartimento e o risco de ativação de incêndio devido ao tipo de ocupação, bem como os valores para os fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas de combate a incêndio, são consideradas com um valor unitário. Isto significa que não é considerada redução ou aumento das características da densidade de carga de incêndio.

Contudo, o Anexo Nacional Francês da EN 1991-1-2 define que a densidade de carga de incêndio pode ser corrigida para ter em conta as medidas de prevenção e proteção contra incêndio, para os casos específicos considerados. Nesse caso, deve ser demonstrado que o valor final considerado não aumenta a probabilidade de colapso, comparado com a situação normal.

Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional Francês são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D8: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (França)

Área do piso do compartimento Af [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupações
25	1	1	Galeria de arte, museu, piscinas
250	1	1	Escritório, residências, hotel, industria de papel
2500	1	1	Fábrica de máquina e motores
5000	1	1	Laboratório químico, oficina de pintura
10000	1	1	Fábrica de pirotecnia e pinturas

Tabela D9: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (França)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	1
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Deteção e alarme automático de incêndio (por Calor/ por Fumo)	1
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	1
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros fora do local	1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndio	1
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1

Tabela D10: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (França)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 90%	Taxa de crescimento de incêndio	RHRf
Habitação	930	Média	250
Hospital	630	Média	250
Hotel (quarto)	460	Média	250
Escritório	740	Rápida	250
Biblioteca de escritório – Arquivos de escritório (armazenamento 3m)	2300	Rápida	500
Sala de reunião	410	Média	250
Sala de aula	530	Média	250
Centro comercial	840	Rápida	500
Teatro	420	Rápida	500
Transporte (espaço público)	140	Lenta	250

Holanda

São indicadas alterações ao procedimento de cálculo no Anexo Nacional Holandês da EN 1991-1-2. Em vez de serem aplicados diretamente os coeficientes delta à densidade de carga de incêndio característica, no anexo Holandês é calculado um fator global de risco. O fator de risco, que deve ser calculado pelo utilizador, é dependente da dimensão do compartimento, ocupação e medidas ativas de combate a incêndio consideradas. O fator é aplicado à curva RHR, não à densidade de carga de incêndio característica. Dependendo da resistência ao fogo requerida, a carga de incêndio é adicionalmente multiplicada com um coeficiente suplementar, que é 0.5 para 30 minutos; 1.0 para 60; 1.5 para 90; 2.0 para 120.

A Tabela D.11, contendo os valores das densidades de carga de incêndio para diferentes ocupações, é alterada. Os valores a serem implementados para o Anexo Nacional Holandês no OZone são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D11: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (Holanda)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 80%	Taxa de crescimento do incêndio	RHRf
Habitação	870	Média	250
Hospital	350	Média	250
Hotel (quarto)	400	Média	250
Biblioteca	1824	Rápida	500
Escritório (padrão)	570	Média	250
Escola	360	Média	250
Centro comercial	730	Rápida	250
Teatro (cinema)	365	Rápida	500
Transportes (espaços públicos)	122	Lenta	250

Hungria

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional da Hungria da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional Húngaro são os da EN 1991-1-2.

Itália

São indicadas algumas alterações para o procedimento de cálculo, bem como para os valores dos diferentes fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio de cálculo no Anexo Nacional Italiano da EN 1991-1-2. Os valores a serem implementados para o Anexo Nacional Italiano no programa OZone são indicados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D12: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (Itália)

Área do piso do compartimento A_f [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}
25	1
250	1
500	1.2
1000	1.4
2500	1.6
5000	1.8
10000	2

O segundo fator para o perigo de ativação é calculado de acordo com o seguinte:

- 0.8 Áreas que têm um risco baixo de incêndio em termos de probabilidade de ignição, velocidade de propagação da chama e possibilidade de controle de incêndio por corpos de bombeiros
- 1.0 Áreas que têm um risco médio de incêndio em termos de probabilidade de ignição, velocidade de propagação da chama e possibilidade de controle de incêndio por corpos de bombeiros
- 1.2 Áreas que têm um risco alto de incêndio em termos de probabilidade de ignição, velocidade de propagação da chama e possibilidade de controle de incêndio por corpos de bombeiros

Tabela D13: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (Itália)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	1/0.6
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1/1/1
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Deteção e alarme automáticos de incêndio (por Calor/ por Fumo)	1/0.85/0.85
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	1/1
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros for a do local	1/0.9/1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1/0.9/0.9
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndios	1/0.9/0.8
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1/1

Luxemburgo

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional do Luxemburgo da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional Luxemburguês são os da EN 1991-1-2.

Portugal

Não são indicadas alterações ao procedimento de cálculo no Anexo Nacional Português da EN 1991-1-2, mas, como no caso do Anexo Nacional Francês, os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio de cálculo são considerados com o valor unitário.

Os valores a serem implementados para o Anexo Nacional Português no OZone são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D14: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (Portugal)

Área do piso do compartimento Af [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupações
25	1	1	Galeria de arte, museu, piscina
250	1	1	Escritório, residência, hotel, indústria de papel
2500	1	1	Fábrica de máquinas e motores
5000	1	1	Laboratório químico, oficina de pintura
10000	1	1	Fábrica de pirotecnia ou tintas

Tabela D15: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (Portugal)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	1
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Deteção e alarme automáticos de incêndio (por Calor/ por Fumo)	1
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	1
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros for a do local	1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndio	1
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1

Reino Unido

O procedimento de cálculo fornecido na PD 6688-1-2 é o mesmo que o da EN 1991-1-2. É introduzido um parâmetro diferente “taxa de crescimento do incêndio”, mas conduz a resultados muito idênticos aos obtidos através da EN 1991-1-2. Todos os valores tendo em conta o risco de ativação de incêndio devido à dimensão do compartimento e o risco de ativação de incêndio devido ao tipo de ocupação, bem como os valores tendo em conta as diferentes medidas de combate a incêndio são consideradas com o valor unitário, exceto para a presença de *sprinklers*.

Os valores a serem implementados para o Anexo Nacional Britânico (PD 6688-1-2) no programa OZone são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D26: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (Reino Unido)

Área do piso do compartimento A_f [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupações
25	1	1	Galeria de arte, museu, piscina
250	1	1	Escritório, residência, hotel, indústria do papel
2500	1	1	Fábrica de máquinas e motores
5000	1	1	Laboratório químico, oficina de pintura
10000	1	1	Fábrica de pirotecnia ou tintas

Tabela D17: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (Reino Unido)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	0.61
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Deteção e alarme automáticos de incêndio (por Calor/ por Fumo)	1
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	1
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros fora do local	1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndios	1
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1

Tabela D18: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (Reino Unido)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 80%	Taxa de crescimento do incêndio	RHRf
Habituação	870	Média	250
Hospital	350	Média	250
Hotel (quarto)	400	Média	250
Biblioteca	2250	Rápida	500
Escritório (padrão)	570	Média	250
Escola	360	Média	250
Centro comercial	900	Rápida	250
Teatro (cinema)	-	-	-
Transporte (espaço público)	-	-	-

República Checa

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional da República Checa da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional da República Checa são os da EN 1991-1-2.

Roménia

Não são indicadas alterações para o procedimento de cálculo nem para os valores dos fatores envolvidos no cálculo da densidade de carga de incêndio no Anexo Nacional da Romênia da EN 1991-1-2. Os valores implementados no OZone para o Anexo Nacional Romeno são os da EN 1991-1-2.

Suécia

Não são indicadas alterações ao procedimento de cálculo no Anexo Nacional Sueco da EN 1991-1-2. Todos os valores para os fatores tendo em conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao risco de ativação do incêndio devido ao tipo de ocupação, bem como os valores dos fatores tendo em conta as diferentes medidas ativas de combate a incêndio, são consideradas com o valor unitário. Isto significa que, não é considerada nem redução nem majoração da densidade de carga de incêndio característica.

Os valores a serem implementados para o Anexo Nacional Sueco da EN 1991-1-2 no programa OZone são apresentados abaixo. As alterações às disposições da EN 1991-1-2 estão destacadas.

Tabela D39: Fatores que têm conta o risco de ativação do incêndio devido à dimensão do compartimento e ao tipo de ocupação (Suécia)

Área do piso do compartimento A_f [m ²]	Perigo de ativação de incêndio δ_{q1}	Perigo de ativação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupações
25	1	1	Galeria de arte, museu, piscina
250	1	1	Escritório, residência, hotel, indústria do papel
2500	1	1	Fábrica de máquinas e motores
5000	1	1	Laboratório químico, oficina de pintura
10000	1	1	Fábrica de pirotecnia ou tintas

Tabela D20: Fatores que têm em conta as diferentes medidas ativas (Suécia)

δ_{n1}	Sistema automático de extinção com água	1
δ_{n2}	Redes independentes de fornecimento de água 0/1/2	1
$\delta_{n3} / \delta_{n4}$	Deteção e alarme automático de incêndio (por Calor/ por Fumo)	1
δ_{n5}	Transmissão automática de alarme aos bombeiros	1
$\delta_{n6} / \delta_{n7}$	Bombeiros no local / Bombeiros for a do local	1
δ_{n8}	Vias de acesso seguras	1
δ_{n9}	Dispositivos de combate a incêndios	1
δ_{n10}	Sistema de exaustão de fumos	1

Tabela D21: Densidades de carga de incêndio, taxa de crescimento de incêndio e RHRf para diferentes tipos de ocupação (Suécia)

Ocupação	Carga de incêndio quantilho de 80%	Taxa de crescimento do incêndio	RHRf
Habitação	750	Média	250
Hospital	360	Média	250
Hotel (quarto)	400	Média	250
Biblioteca	1800	Rápida	500
Escritório (padrão)	520	Média	250
Escola	450	Média	250
Centro comercial	400	Rápida	250
Teatro (cinema)	370	Rápida	500
Transporte (espaço público)	122	Lenta	250

ANEXO E – PROCEDIMENTO DE INCÊNDIO LOCALIZADO

O procedimento de incêndio localizado implementado no OZone é baseado no trabalho realizado no projeto de investigação RFSR-CT-2012-00023 LOCAFI - *Temperature assessment of a vertical steel member subjected to LOCALised Fire*. O modelo analítico para incêndios localizados foi desenvolvido no projeto com dois níveis de refinamento:

- Um modelo baseado em integração numérica para implementação em modelos avançados como o *SAFIR* e o *Ansys* – “modelos geométricos”;
- Um modelo baseado em formulação analítica para cálculo manual ou implementação em ferramentas básicas de engenharia como folhas de cálculo Excel – “modelo simplificado”.

Nos dois modelos, as configurações onde as trocas térmicas são devidas a fluxos convectivos (elementos envolvidos pelo incêndio ou situados no interior da camada de fumo) são tratados através da aplicação das equações existentes e disponibilizadas na EN 1991-1-2. As maiores trocas de calor, por radiação, são calculadas através da representação do incêndio como uma chama sólida virtual que irradia em todas as direções. O primeiro passo deste cálculo é comum para o modelo geométrico e para o modelo simplificado e consiste em definir a geometria da chama sólida virtual representando o incêndio localizado e a distribuição de temperatura como uma função do tempo.

A forma da chama virtual sólida que representa a ação térmica do incêndio localizado pode ser cilíndrica ou cônica. A chama de forma cilíndrica é mais fácil de utilizar, mas geralmente representa de forma menos correta o efeito térmico induzido pelo incêndio e leva a fluxos de calor por radiação sobredimensionados. No caso do comprimento da chama ser superior à altura do teto, o cilindro ou o cone deve ser truncado e um anel radiante, representando a dispersão da chama debaixo do teto, deve ser considerado fora do cilindro ou cone truncado.

A diferença entre o modelo geométrico e simplificado é o método de cálculo utilizado para avaliação dos fluxos de calor por radiação trocados entre a chama sólida virtual e os elementos.

De forma a propor-se um método de cálculo sem integral de superfície (que geralmente requer a implementação num *solver*), o modelo simplificado implementado no OZone foi definido com base em fatores de vista. Para formas simples como cilindros ou anéis existem fórmulas diretas para várias condições. Através de ligeiras adaptações da chama sólida virtual, estas condições são satisfeitas e o cálculo dos fluxos de calor por radiação pode ser realizado utilizando o conceito de fator de vista.

O modelo simplificado implementado no *software* OZone considera uma forma cônica para a chama sólida virtual uma vez que foi demonstrado que esta forma conduz a uma melhor previsão dos fluxos. O fluxo é calculado separadamente para as 4 faces do contorno do perímetro do perfil e um valor médio desse fluxo é aplicado a todo o perímetro da secção de aço. Isto significa que o efeito de sombra não é tido em conta. A combinação entre incêndio localizado e incêndio em compartimento permite combinar as influências dos fluxos de calor por radiação através da zona fria e dos fluxos convectivos na zona quente. Os dados de entrada da parte “Incêndio Localizado” necessita que seja definida a posição, diâmetro e evolução da RHR com o tempo para um número máximo de 5 incêndios. O cálculo das temperaturas do aço sob os fluxos de calor calculados foi avaliado previamente e assume que a temperatura é uniforme na secção transversal.

Mais informação detalhada sobre o modelo simplificado para incêndios localizados implementado no OZone é fornecida no *Report of the research project RFSR-CT-2012-00023 LOCAFI - Temperature assessment of a vertical steel member subjected to LOCALised Fire*.

ANEXO F – ESTRATÉGIA DE ANÁLISE E CRITÉRIO DE TRANSIÇÃO

Se um incêndio é modelado através da curva simples representada na Figura F.1 a fase de crescimento, representada aqui pela curva t^2 , atinge um máximo no momento em que se dá a ignição de todo o combustível. Se a ignição do combustível acontece apenas pelo alastramento da chama, o máximo é atingido sem modificação da curva inicial t^2 . Se as temperaturas dos gases quentes da camada superior de um incêndio atingem uma temperatura suficientemente alta (cerca de 500 °C a 600 °C), os fluxos por radiação entre o gás quente e os materiais combustíveis que não arderam pode ser tão alto que provoca a ignição do combustível. Nesse momento há um aumento muito rápido da taxa libertação de energia. Este fenómeno é chamado de *flashover*. Esta alteração é feita modificando a curva de taxa de libertação de calor inicial como indicado pela linha a tracejado na Figura F.1. No momento de *flashover*, a curva RHR é abandonada e vai até ao seu valor máximo igual ao à área máxima de incêndio multiplicada pela densidade de taxa de libertação de calor, RHR_f .

Se os gases em contacto com o combustível atingirem uma temperatura de cerca de 300 °C, o combustível também começa a arder e a taxa de libertação de calor aumenta como indicado para o fenómeno de *flashover*.

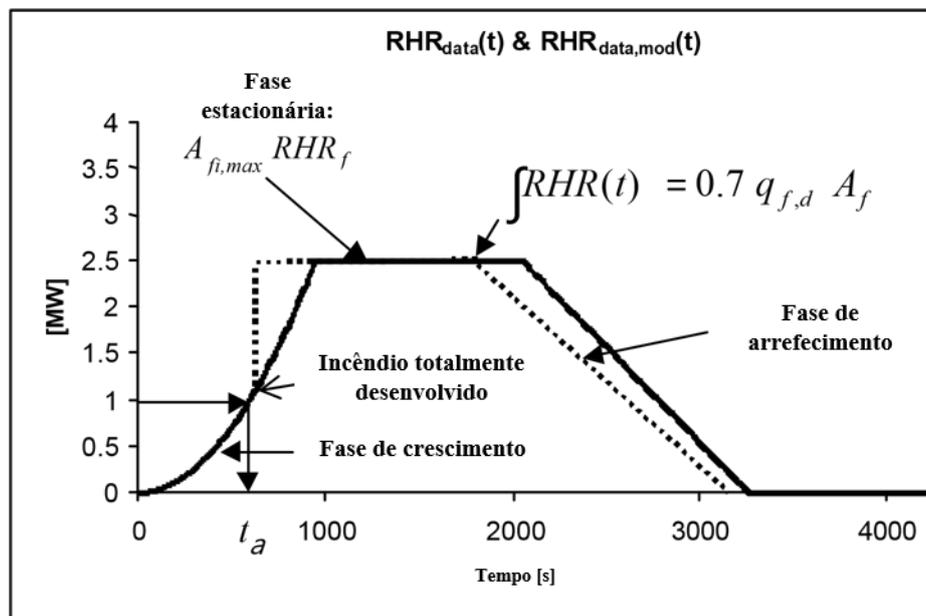


Fig. F1 Alteração da RHR(t) no caso de ocorrer *flashover*

Os critérios de transição de duas para uma zona e/ou de modificação do modelo de fonte de incêndio são indicados seguidamente.

Critério 1 (C1): $T_U > T_{FL}$

Alta temperatura dos gases da camada superior, compostos de produtos de combustão e entrada de ar, provoca *flashover*. Todo o combustível no compartimento começa a arder por fluxos de radiação provenientes da camada superior. A temperatura de *flashover* é definida como 500 °C.

Critério 2 (C2): $Z_s < Z_q$ e $T_Z > T_{ignition}$

Se os gases em contacto com o combustível tiverem uma temperatura mais alta que a temperatura de ignição do combustível ($T_{ignition}$), a propagação do incêndio a todo o combustível do compartimento irá acontecer por ignição convectiva. Os gases em contacto (à temperatura T_Z) podem pertencer à camada inferior de um modelo de duas zonas, à camada superior de gases quentes (se a diminuição da altura da interface (Z_s) levar a colocar combustível na camada de fumo - Z_q é a altura máxima do material combustível) ou à única zona de um modelo de uma zona. A $T_{ignition}$ é assumida como sendo 300 °C.

Critério 3 (C3): $Z_s < 0.2 H$

A altura da interface diminui e leva a uma espessura da camada muito pequena, que não é representativa do fenómeno de duas zonas.

Critério 4 (C4): $A_{fi} > 0.25 A_f$

A área de incêndio é muito alta comparada com a superfície do pavimento do compartimento para se considerar que o incêndio permanece confinado.

O critério 1 ou 2 leva necessariamente à modificação da taxa de libertação de calor. Se o incêndio permanecer localizado (o critério C4 não é atingido), a simulação continua utilizando um modelo de duas zonas e se a carga de incêndio for uniformemente distribuída, será considerado um modelo de uma zona. Se um dos critérios C3 ou C4 é atingido, o código irá trocar para um modelo de uma zona, mas a RHR não será modificada, exceto se o critério C1 ou C2 forem atingidos simultaneamente. A Tabela F.1 e as Figuras F.2 e F.3 resumem os quatro critérios.

Tabela F.1 Critério de transição

CRITÉRIO	EFEITO	
	LOCALIZADA q_f	DISTRIBUIDA q_f
C1 : $T_U > 500^\circ\text{C}$	$A_{fi} = A_{fi,max}$	$1ZM + A_{fi} = A_{fi,max}$
C2 : $Z_s < H_q$ e $T_U > T_{ignition}$ (2ZM) ou, $Z_s > H_q$ e $T_L > T_{ignition}$ (2ZM) ou, $T > T_{ignition}$ (1ZM)	$A_{fi} = A_{fi,max}$	$1ZM + A_{fi} = A_{fi,max}$
C3 : $Z_s < H$	1ZM	1ZM
C4 : $A_{fi} > 0.25\% A_f$	-	1ZM

Se a carga de incêndio estiver confinada são possíveis cinco caminhos diferentes:

- CAMINHO 1 - Nenhum critério é verificado e o modelo irá permanecer com duas zonas e a curva RHR não será modificada até ao fim do incêndio.
- CAMINHO 2 - O critério C1 ou C2 é verificado primeiramente, levando à modificação da RHR. O critério C3 não é verificado, o modelo permanece com duas zonas.
- CAMINHO 3 - O critério C1 ou C2 é verificado primeiramente, levando à modificação da RHR. O critério C3 é verificado, o modelo troca de duas zonas para uma zona.
- CAMINHO 4 - O critério C3 é verificado primeiramente, o modelo troca de duas zonas para uma zona. O critério C1 ou C2 não são verificados, levando à modificação da RHR.
- CAMINHO 5 - O critério C3 é verificado primeiramente, o modelo troca de duas zonas para uma zona. O critério C1 ou C2 é verificado, levando à modificação da RHR.

Se a carga de incêndio for uniformemente distribuída, são possíveis três caminhos diferentes:

- CAMINHO 6 - O critério C1 ou C2 é verificado, levando à modificação da RHR e à simultânea troca de modelo de duas zonas para uma zona.
- CAMINHO 7 - O critério C3 ou C4 é primeiramente verificado, o modelo troca de duas zonas para uma zona. Os critérios C1 e C2 não são verificados, levando à não modificação da RHR.
- CAMINHO 8 - O critério C3 ou C4 é primeiramente verificado, o modelo troca de duas zonas para uma zona. O critério C1 ou C2 é então verificado, levando à modificação da RHR.

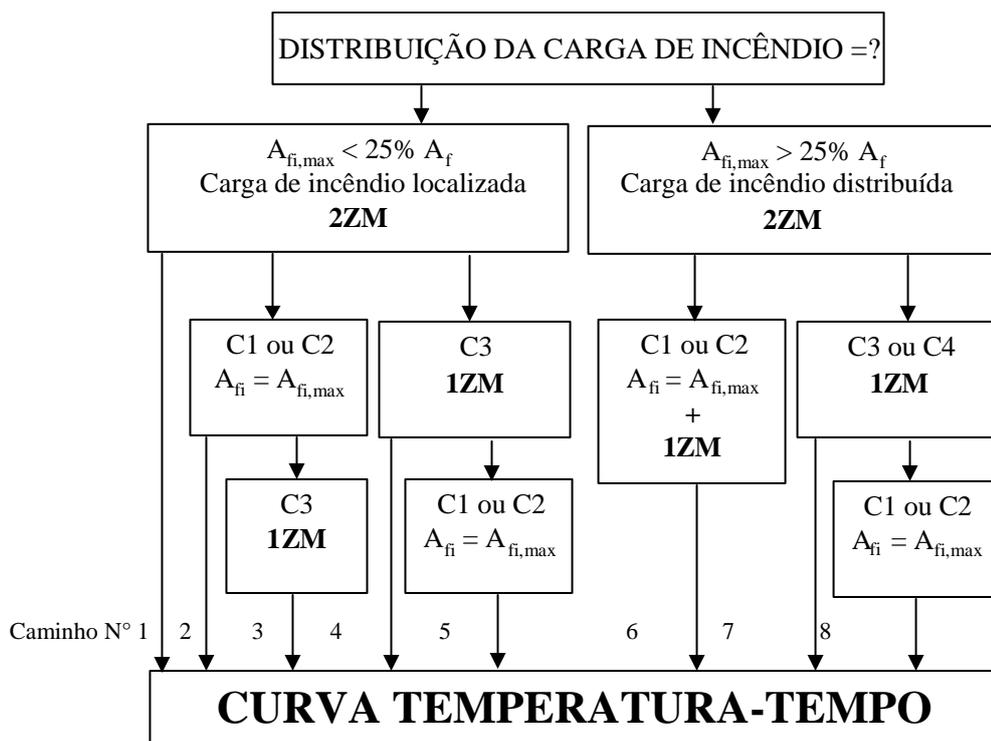


Fig. F.2 Fluxograma da estratégia de combinação

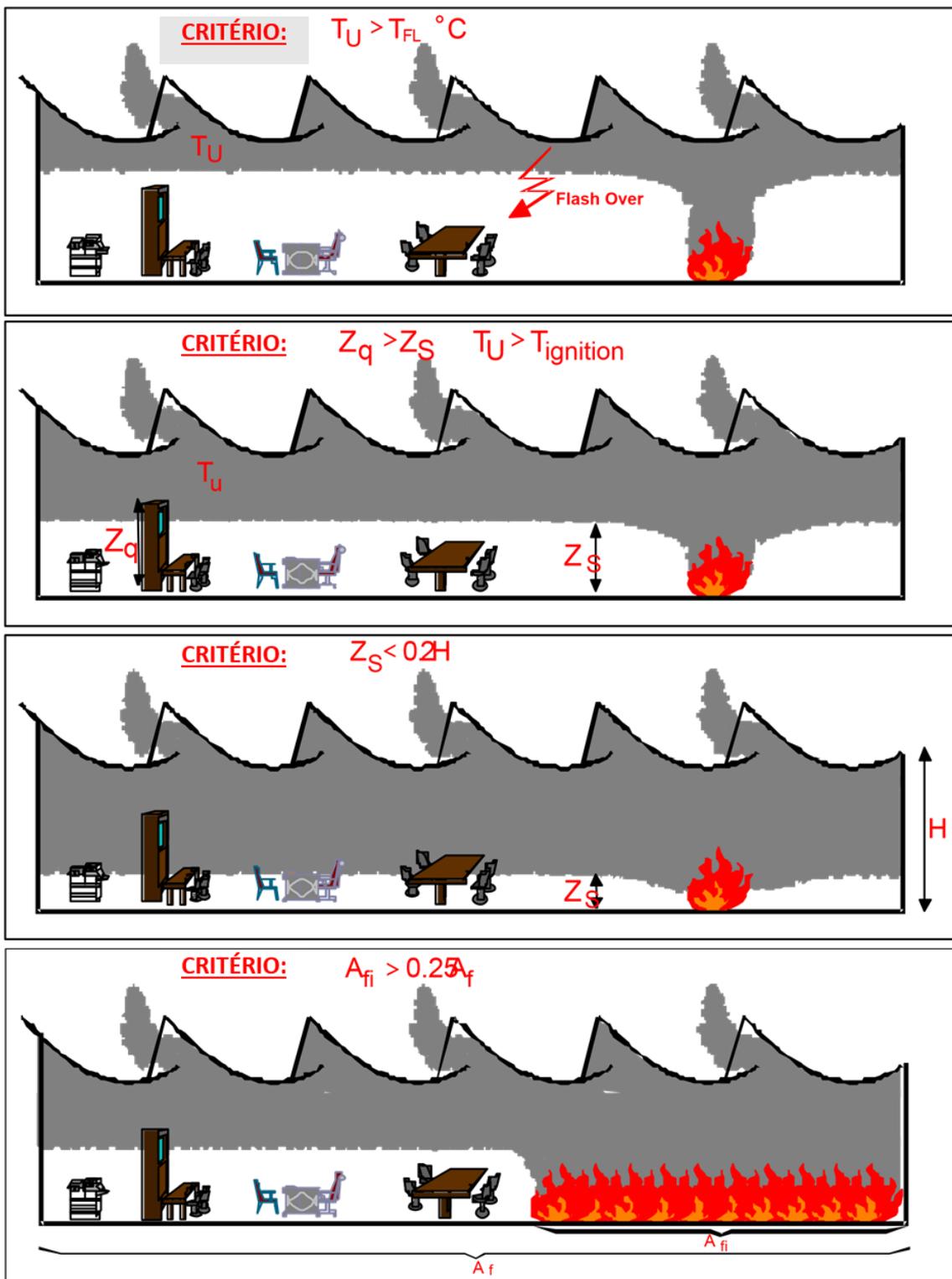


Fig. F3 Quatro critérios para trocar de modelo de duas zonas para uma zona e/ou modificação da taxa de libertação de calor

BIBLIOGRAFIA

J-F. Cadorin, J-M. Franssen, A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2 - Part 1 : Pre and post flashover compartment fire model, Fire Safety Journal, accepted for publication in May 2002.

J-F. Cadorin, D. Pinteá, J-C Dotreppe, J-M. Franssen, A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2 Part 2: Methodology and application, Fire Safety Journal, accepted for publication in May 2002.

RFSR-CT-2012-00023 LOCAFI - Temperature assessment of a vertical steel member subjected to LOCALised Fire, European Commission, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, 2015

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, 2nd Edition, 1995.

G. P. Forney and L. Y. Cooper, The Consolidated Compartment Fire Model (CCFM) Computer Application. VENTS, Parts I, II, III, IV. NISTIR, National Institute of Standards and Technology, 1990.

G. P. Forney and W. F. Moss, Analysing and exploiting numerical characteristics of zone fire models, Fire Science & Technology, Vol. 14, No.1 & 2, 49-60, 1994.

M. Curtat, P. Fromy; Prévísion par le calcul des sollicitations thermiques dans un local en feu, Première partie: le modèle et le logiciel NAT, Cahiers du CSTC, livraison 327, cahier 2565, mars 1992

J. M. Franssen, Contributions à la modélisation des incendies dans les bâtiments et de leurs effets sur les structures, Thèse d'agr. de l'ens. sup., F.S.A., Univ. of Liege, 1997.

Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.2 : General rules. Structural fire design. ENV 1993-1-2, CEN, Bruxelles, may 1995.

Y. Hasemi et T. Tokunaga, Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames, Fire Science and Technology, 4, 15-26, 1984.

Y. Hasemi, S. Yokobayashi, T. Wakamatsu et A. Ptchelintsev, Fire Safety of Building Components Exposed to a Localised Fire - Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localised Fire, First Int. ASIAFLAM Conf. at Kowloon, Interscience Communications Ltd, London, 351-360, 1995.

A. Ptchelintsev, Y. Hasemi et M. Nikolaenko, Numerical Analysis of Structures Exposed to Localised Fire, First Int. ASIAFLAM Conf. at Kowloon, Interscience Communications Ltd, London, 539-544, 1995.

T. Wakamatsu, Y. Hasemi, Y. Yokobayashi and A. Ptchelintsev, Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling Exposed to a Localised Fire, second INTERFLAM 96 conference, Cambridge, 509-518, 1996.

Franssen, Jean-Marc (ed.). Structures in fire : proceedings of the first international workshop. Copenhagen, Denmark, 19th and 20th of June, 2000. University of Liege (2000), s.211 - 224.

CEC Agreements 7210-SA/211/318/518/620/933. Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks. Final Report, February 97.

CEC Agreements 7210-SA/125/126/213/214/323/423/522/623/839/937. "Competitive Steel Buildings through Natural Fire Safety Concept", Technical report n°6; July 97.

L. Y. Cooper, VENTCF2: an Algorithm and Associated FORTRAN 77 Subroutine for Calculating Flow through a Horizontal Ceiling/Floor Vent in a Zone-type Compartment Fire Model, Fire Safety Journal, Volume 28, Issue 3, April 1997, Pages 253-287.

L. Y. Cooper, Calculating Combined Buoyancy- and Pressure-driven Flow through a Shallow, Horizontal, Circular Vent: Application to a Problem of Steady Burning in a Ceiling- vented Enclosure, *Fire Safety Journal*, Volume 27, Issue 1, July 1996, Pages 23-35.

X. C. Zhou and J. P. Gore, Air Entrainment Flow Field Induced by a Pool Fire, *Combustion and Flame*, Volume 100, Issues 1-2, January 1995, Pages 52-60.

Marc L. Janssens, *An Introduction to Mathematical Fire Modeling*, 2nd edn.; Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, USA, 2000, xi, 259 pages, paperback, ISBN 1-56676-920-5

B. Karlsson, J. G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press 2000.