

Determinação da temperatura em estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio.

Análise do método europeu

Valdir Pignatta Silva¹, Macksuel Soares de Azevedo²

Resumo

A pesquisadora britânica Margaret Law propôs um método, introduzido nos Eurocodes 1 e 3, que permite determinar a temperatura nos elementos de aço externos a edificações em incêndio. Os autores desenvolveram um programa de computador com base nesse método. A base teórica do método e alguns resultados serão comparados a resultados de ensaios de incêndio real realizados em (Dalmarnock e Ostrava) e a resultados obtidos por meio do emprego de métodos numéricos (programas Smartfire e SuperTempcalc).

Palavras-chave: Incêndio. Aço. Estrutura externa. Margaret Law.

1 Introdução

Sabe-se que os materiais estruturais têm sua resistência e módulo de elasticidade reduzidos quando submetidos a temperaturas elevadas, como ocorre durante um incêndio. O campo de temperaturas nas estruturas depende da curva temperatura-tempo dos gases quentes no ambiente em chamas. Geralmente, em edifícios altos, a estrutura de aço interna é protegida por revestimento contra fogo. A espessura desse revestimento pode ser determinada por meio de ensaios ou analiticamente (Eurocode 3 Part 1-2 2005; Silva 2005). As estruturas externas atingem temperaturas menores do que as internas e, se projetadas adequadamente, podem prescindir do revestimento. A pesquisadora britânica Margaret Law (Law, 1978) propôs um método para se determinar a temperatura em estruturas externas de aço. Esse método, com pequenas modificações, foi incluído nas normas europeias Eurocode 1, Part 1-2 (2002) e Eurocode 3, Part 1-2 (2005). Em vista do grande número de variáveis e equações envolvidas, os autores desenvolveram o programa de

¹ Professor Doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, n. 271. São Paulo. CEP 05508-900. Endereço Eletrônico: valpigss@usp.br. Autor correspondente.

² Professor Doutor da Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil. Endereço Eletrônico: macksuel@ct.ufes.br

computador Exteelfire 2.0 para efetuar os cálculos, como descrito em Azevedo (2010). Nesse artigo os resultados da aplicação do programa são comparados aos obtidos por via numérica, empregando programas de computador Smartfire e SuperTempcalc, e a resultados de ensaios em escala natural realizados em Dalmarnock (REIN, 2007) e Ostrava (WALD, 2009).

2 O método

A temperatura de um elemento de aço externo à edificação, quando envolvido pela chama, pode ser determinada a partir da condição de equilíbrio térmico apresentada na Eq. (1), cujos termos são descritos em maior detalhe a seguir.

$$\dot{h}_{cz} + \dot{h}_{rz} + \dot{h}_{rf} + \dot{h}_{ro} = \dot{h}_{abs} + \dot{h}_{perd} \quad (1)$$

A Eq. (2) representa o fluxo de calor por unidade de área devido à convecção na chama (kW/m^2), em que α_z é o coeficiente de transferência de calor por convecção da chama ($\text{kW/m}^2\text{°C}$), θ_z é a temperatura da chama externa (°C) e θ_a é a temperatura do aço (°C).

$$\dot{h}_{cz} = \alpha_z [(\theta_z + 273,15) - (\theta_a + 273,15)] = \alpha_z [\theta_z - \theta_a] \quad (2)$$

A Eq. (3) representa o fluxo de calor por unidade de área devido à radiação da chama (kW/m^2), em que ε_z e ε_a são os fatores de emissividade da chama e do aço, respectivamente, ϕ_z é o fator de configuração da chama e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que vale $56,7 \times 10^{-12} \text{ kW/m}^2\text{°C}^4$.

$$\dot{h}_{rz} = \phi_z \varepsilon_z \varepsilon_a \sigma [(\theta_z + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] \quad (3)$$

A Eq. (4) representa o fluxo de calor por unidade de área devido à radiação das aberturas do compartimento (kW/m^2), em que ϕ_f é o fator de configuração das janelas em relação à superfície do aço, ε_f é a emissividade da abertura do compartimento e θ_g é a temperatura dos gases dentro do compartimento incendiado (°C). A parcela $(1 - \varepsilon_z)$ do fluxo é aquela realmente transmitida ao aço; outra parte (ε_z) é absorvida pela chama e transferida ao elemento através da radiação da chama ($\dot{h}_{cz}$).

$$\dot{h}_{rf} = \phi_f \varepsilon_f \varepsilon_a (1 - \varepsilon_z) \sigma [(\theta_g + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] \quad (4)$$

A Eq. (5) representa o fluxo de calor devido à radiação do ambiente em torno do elemento (kW/m^2), em que θ_o é a temperatura do ar no ambiente externo à edificação e a emissividade ε_o do ambiente é unitária. O aquecimento desse “ambiente” é decorrente dos termos $(1-\phi_f)$, devido à radiação das aberturas, e $(1-\varepsilon_z)$, devido à radiação das chamas, que não foram transferidas diretamente ao elemento por meio de $\dot{h}_{tz}$ e $\dot{h}_{tf}$.

$$\dot{h}_{ro} = (1-\phi_f)\varepsilon_a(1-\varepsilon_z)\sigma[(\theta_o + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] \quad (5)$$

A Eq. (6) representa calor absorvido pelo elemento de aço na unidade de tempo por unidade de área superficial, em que ρ_a é a massa específica do aço, c_a é o calor específico do aço e F é o fator de massividade (relação entre área aquecida e volume) do elemento estrutural.

$$\dot{h}_{abs} = \frac{\rho_a c_a}{F} \frac{d(\theta_a + 273,15)}{dt} \quad (6)$$

$\dot{h}_{perd}$ representa a intensidade de calor perdido por condução distante da área aquecida, a qual será desprezada, a favor da segurança.

Substituindo-se as Equações (2) a (6) na Eq. (1), tem-se a Eq. (7).

$$\begin{aligned} & \alpha_z[\theta_z - \theta_a] + \phi_z \varepsilon_z \varepsilon_a \sigma[(\theta_z + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] + \\ & + \phi_f \varepsilon_f \varepsilon_a (1-\varepsilon_z) \sigma[(\theta_g + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] + \\ & + (1-\phi_f)\varepsilon_a(1-\varepsilon_z)\sigma[(\theta_o + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] = \frac{\rho_a c_a}{F} \frac{d(\theta_a + 273,15)}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

Admitindo-se $\varepsilon_a = 1$, $\varepsilon_f = 1$ e $\varepsilon_z = 1$ (devido ao aço estar imerso nas chamas) e desprezando-se θ_o^4 em relação à θ_a^4 , resulta a Eq. (8), que, simplificada, torna-se a Eq. (9).

$$\begin{aligned} & \alpha_z[(\theta_z + 273,15) - (\theta_a + 273,15)] + \varepsilon_z \sigma[(\theta_z + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] + \\ & + \phi_f \varepsilon_f (1-\varepsilon_z) \sigma[(\theta_g + 273,15)^4 - (\theta_a + 273,15)^4] + \\ & + (1-\phi_f)\varepsilon_a(1-\varepsilon_z)\sigma[-(\theta_a + 273,15)^4] = \frac{\rho_a c_a}{F} \frac{d(\theta_a + 273,15)}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_z[(\theta_z + 273,15) - (\theta_a + 273,15)] + \varepsilon_z \sigma(\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f \varepsilon_f (1-\varepsilon_z) \sigma(\theta_g + 273,15)^4 - \\ & - \sigma(\theta_a + 273,15)^4 = \frac{\rho_a c_a}{F} \frac{d(\theta_a + 273,15)}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

Law (1978) propõe adotar θ_g constante e igual ao seu valor máximo, o que anula a parcela à direita da Eq. (9) e exclui o fator de massividade da seção do perfil na determinação da temperatura, resultando na Eq. (10).

$$\alpha_z [\theta_z - \theta_a] + \varepsilon_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f (1 - \varepsilon_z) \sigma (\theta_g + 273,15)^4 - \sigma (\theta_a + 273,15)^4 = 0 \quad (10)$$

Reordenando a Eq (10), tem-se, finalmente a Eq. (11) que é a expressão recomendada pelo Eurocode 3, Part 1-2 (2005). α_z , θ_z , ε_z , ϕ_f devem ser determinados conforme instruções do Eurocode 3, Part 1-2 (2005) e do Eurocode 1, Part 1-2 (2002).

$$\sigma (\theta_a + 273,15)^4 + \alpha_z \theta_a = \varepsilon_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f (1 - \varepsilon_z) \sigma (\theta_g + 273,15)^4 + \alpha_z \theta_z \quad (11)$$

Quando a superfície do aço estiver fora do fluxo convectivo da chama e dos gases quentes, ou seja, quando o elemento estrutural não estiver envolvido pela chama, o equilíbrio térmico é determinado pela mesma Eq. (1), com as seguintes modificações: $\dot{h}_{cz} = 0$, pois o elemento de aço está fora da chama, $\dot{h}_{perd} = \alpha_a (\theta_a - \theta_0)$, em que $\dot{h}_{perd}$ representa a intensidade de calor perdido pelo aço por convecção e α_a é o fator de convecção do aço, $\varepsilon_a = 1$, $\varepsilon_f = 1$, θ_0^4 desprezado em relação à θ_a^4 e θ_g constante, tem-se a Eq. (12), que, reordenada e aproximando 273,15 °C por 273 °C resulta na Eq. (13), que é a expressão recomendada pelo Eurocode3, Part 1-2 (2005). α_a , θ_z , ε_z , ϕ_f devem ser determinados conforme instruções do Eurocode 3, Part 1-2 (2005) e do Eurocode 1, Part 1-2 (2002).

$$\varepsilon_z \phi_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f \sigma (\theta_g + 273,15)^4 - \sigma (\theta_a + 273,15)^4 - \alpha_a [\theta_a - \theta_0] = 0 \quad (12)$$

$$\sigma (\theta_a + 273)^4 + \alpha_a \theta_a = \varepsilon_z \phi_z \sigma (\theta_z + 273)^4 + \phi_f \sigma (\theta_g + 273)^4 + 293 \alpha_a = 0 \quad (13)$$

A partir das eq. 11 ou 13 é possível determinar-se o valor de θ_a .

3 Exteelfire

A fim de se resolver o grande número de equações e variáveis, foi desenvolvido o programa de computador Exteelfire 2.0 (AZEVEDO, 2010) no ambiente Visual Basic. A partir dos dados de entrada, tais como o valor de cálculo da carga de incêndio, geometria do compartimento e posição de pilares ou vigas, é possível determinar-se a temperatura dos elementos estruturais de aço

externos à edificação. Exaustivas comparações a resultados obtidos em outro programa de computador, desenvolvido pelos autores em Mathcad, além de análises de sensibilidade paramétricas e de situações físicas realísticas foram estudadas. Todos os resultados foram consistentes com os esperados, como descrito por Azevedo (2010). O ExteelFire foi comparado às ferramentas existentes até então, incluindo o programa de computador Fires desenvolvido pela Universidade de Liège para a siderúrgica ARBED (atual Mittal) e tabelas do American Iron and Steel Institute (1979), concluindo-se que o ExteelFire é mais completo e atual do que ambas as ferramentas (AZEVEDO, 2010). Como exemplo de aplicação, em Silva e Azevedo (2009) apresentam-se análises de sensibilidade paramétrica e situações em que se pode dispensar o uso de materiais de revestimento contra fogo, realizadas empregando o Exteelfire.

4 Comparação entre resultados do exteelfire e programas CFD/MEF

4.1 Modelo ensaiado

Para fins de comparação entre o método simplificado e outro via CFD, realizaram-se ensaios numéricos em diversos modelos geométricos, empregando-se dois programas: ExteelFire 2.0 e Smartfire V4.1. O último se constitui em um código computacional tipo CFD (ComputationalFluid Dynamics) para simulação de incêndio, desenvolvido pelo FSEG (FireSafetyEngineeringGroup), da Universidade de Greenwich (EWER et al. 2004). As duas geometrias de compartimento adotadas no estudo são apresentadas na figura 1. Como parâmetro de entrada no Smartfire, adotou-se uma taxa de combustão calculada pelo ExteelFire para carga de incêndio específica igual a 700 MJ/m^2 . Foram usados valores de taxa de combustão iguais a 6,384 MW e 7 MW, de taxa de liberação de massa iguais a 0,5124 kg/s e 0,5618 kg/s e de fator de ventilação iguais a $0,087 \text{ m}^{1/2}$ e $0,145 \text{ m}^{1/2}$, respectivamente para os modelos 1 e 2. O primeiro modelo foi usado com controle do incêndio pela ventilação e o segundo pelo combustível. A fonte do incêndio possuía geometria com 3 m de largura, 2 m de profundidade e 0,80 m de altura, conforme a Figura 1c.

Para o material combustível, adotou-se a madeira de pinho seco. Em vista de o método de M. Law reunir informações de diferentes ensaios, o que dificulta a identificação do tipo de madeira empregado, foi adotado 12,46 MJ/kg como potencial calorífico da madeira (pinho seco), por recomendação do FSEG (EWER, 2008). A taxa de liberação de massa do incêndio está associada à reação química da espécie de combustível (pinho seco) e ao oxigênio presente no ar. Para o modelo estudado, introduziu-se um limite de oxigenação para ocorrer a combustão em função da

temperatura (Ewer 2008): 23% para temperaturas abaixo de 400 °C, 14% para temperaturas acima de 600 °C e, entre essas temperaturas, interpolou-se linearmente. A temperatura inicial do ar considerada foi de 20°C. Para reduzir o esforço computacional foi empregada, a favor da segurança, uma curva potência-tempo constante no tempo, convertendo a taxa de liberação de calor (MW) extraída do ExteelFire na taxa de liberação de massa do combustível (kg/s). As paredes do compartimento são compostas de tijolos cerâmicos, o piso e o teto são de concreto armado. As propriedades físicas e térmicas necessárias à modelagem são descritas na tabela 1, em que λ é a condutividade térmica, c é o calor específico, ρ é a densidade, μ é a viscosidade laminar, β é o coeficiente de expansão térmica, e P é o peso molecular.

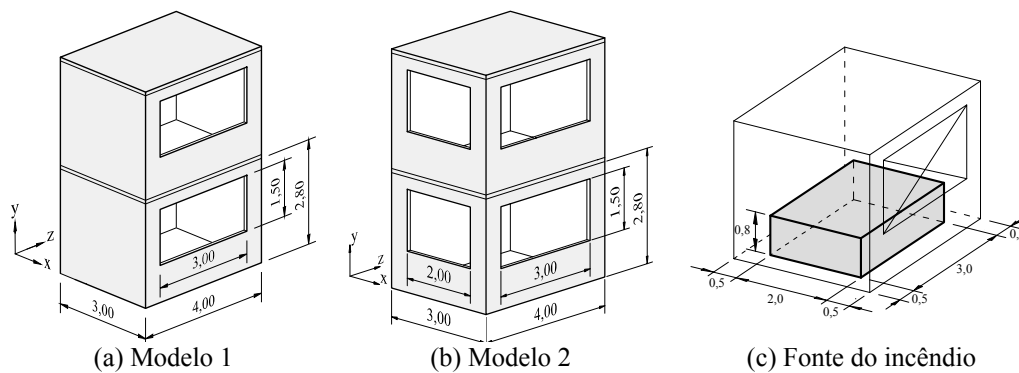


Figura 1: Geometria do compartimento

Tabela 1: Propriedades dos materiais (EWER, 2008)

Descrição	Nome	λ [W/mK]	c [J kg/K]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	β [K ⁻¹]	P [kg/Kmol]
Aberturas	Ar	0,026	1045,78	1,177	0,00002	0,00329	29,35
Paredes	Tijolo	0,69	840,00	1600,00	10×10^{-9}	--	--
Piso/teto	Concreto	1,60	1000,00	2400,00	10×10^{-9}	--	--

4.2 Temperatura no interior do compartimento

Na Figura 2 (modelo 1) nota-se que, de uma forma geral, as temperaturas estimadas pelo Smartfire (isotermas coloridas) foram inferiores à temperatura máxima dos gases dentro do compartimento, calculadas pelo ExteelFire (pontos X), para determinadas posições. Somente em determinados pontos, principalmente em torno da fonte de calor, ocorrem temperaturas iguais ou pouco maiores do que aquela calculada pelo ExteelFire. Na figura 3 (modelo 2) verifica-se que a

temperatura dos gases calculada pelo ExteelFire está distribuída pelo interior do compartimento. Os resultados determinados por meio dos dois programas, ExteelFire e Smartfire, aproximam-se em compartimentos com maior ventilação, em compartimento com pouca ventilação os resultados do ExteelFire são maiores. Possivelmente, M. Law baseou seu método em resultados obtidos em compartimentos mais ventilados.

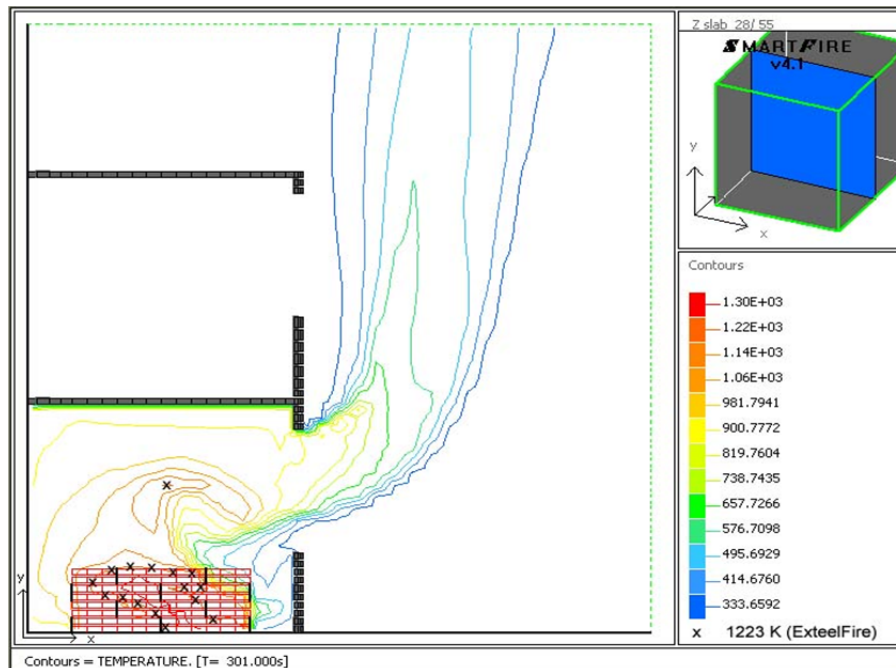


Figura 2: Modelo 1. Temperaturas (K) no interior do compartimento. Corte no plano xy. isothermas coloridas vêm do Smartfire; pontos X vêm do ExteelFire

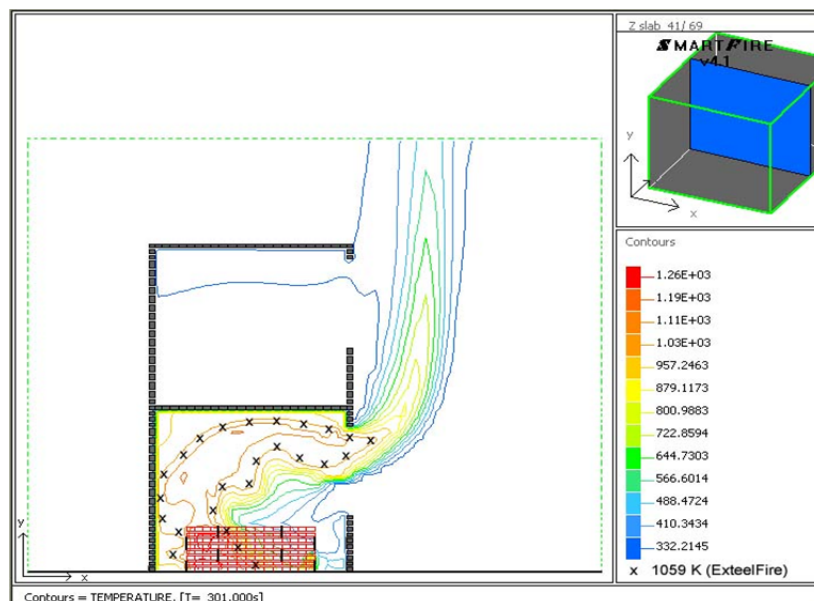


Figura 3: Modelo 2. Temperaturas (K) no interior do compartimento. Corte no plano xy.

4.3 Temperatura da chama na janela

Na Figura 4 apresentam-se as isothermas típicas para compartimentos dos dois modelos. Em todos os casos, o método simplificado superestima o valor da temperatura da chama na janela, se comparado aos resultados do Smartfire. As isothermas coloridas foram estimadas pelo Smartfire e a temperatura de 1270 K, estimada pelo ExteelFire, não aparece na figura, pois em nenhum ponto esse valor foi atingido.

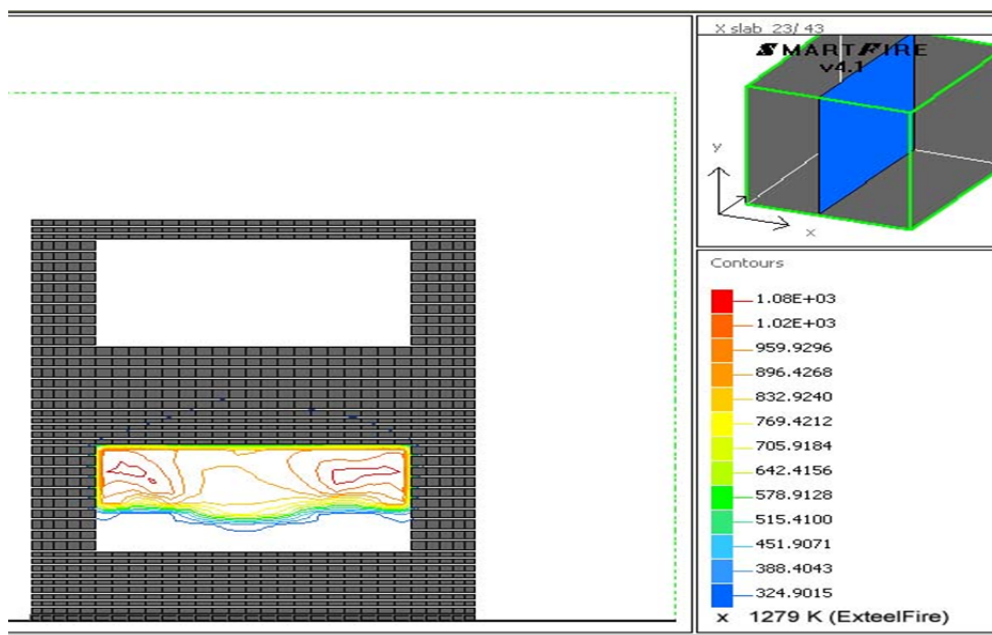


Figura 4: Modelo 1. Temperaturas (K) no plano da janela. Corte no plano yz.

4.4 Altura da chama externa

Na Figura 5, mostra-se a variação da altura máxima da chama que emerge para fora do compartimento incendiado durante um período de simulação do Smartfire, comparada à altura calculada pelo ExteelFire. Considerou-se, como altura máxima da chama, o maior valor alcançado, acima do topo da abertura, para a temperatura de 538 °C, que é o valor adotado por Law (1978). Nota-se que, durante a maior parte do evento, a altura da chama, determinada pelo ExteelFire, está acima da média dos valores encontrados pelo Smartfire.

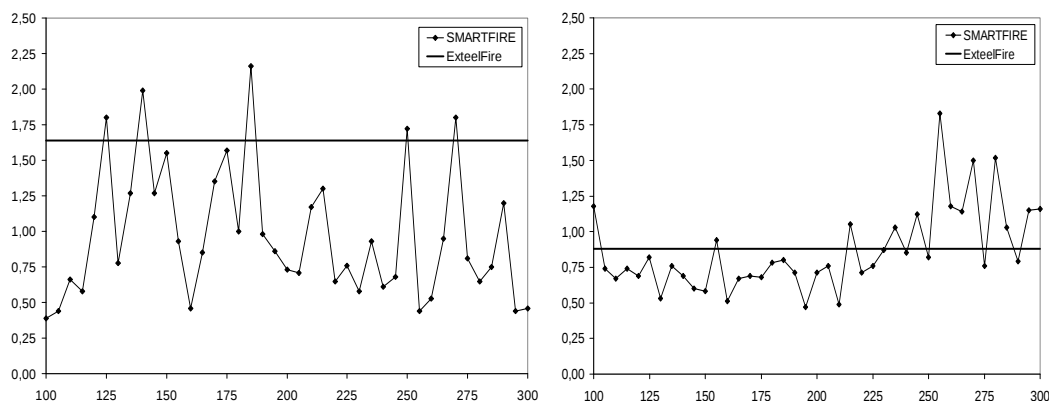


Figura 5: Altura das chamas (m) em função do tempo (s). Modelos 1 (esquerda) e 2 (direita)

4.5 Temperatura no aço

Foi realizada análise térmica computacional de 4 seções transversais e 2 distâncias relativas à abertura, conforme figura 6. Por meio do Smartfire, determinaram-se curvas temperatura-tempo do gás em 3 pontos coincidentes com o CG das mesas e da alma. Essas foram aplicadas, respectivamente, em todo o contorno dos respectivos elementos (mesa e alma). As temperaturas do perfil foram determinadas por meio do programa de computador SuperTempcalc – Temperature Calculation and Design v.5, desenvolvido pela FSD (FireSafety Design – Suécia), por meio do método dos elementos finitos (ANDERBERG, 1997). Foi utilizado o modelo 1 (Figura 1).

Na Figura 7 é apresentada a variação de temperaturas do pilar de seção mais esbelta distante 0,50 m da abertura. Verifica-se que, devido à maior ação térmica, os valores relativos entre as temperaturas dos 3 elementos do perfil rapidamente convergem para a mesma relação das temperaturas atuantes. Na figura 8 é apresentada a variação de temperaturas do pilar de seção mais robusta, distante 1,00 m da abertura. Surgem gradientes consideráveis, no entanto, a baixas temperaturas. Na Tabela 2 resumem-se os resultados encontrados.

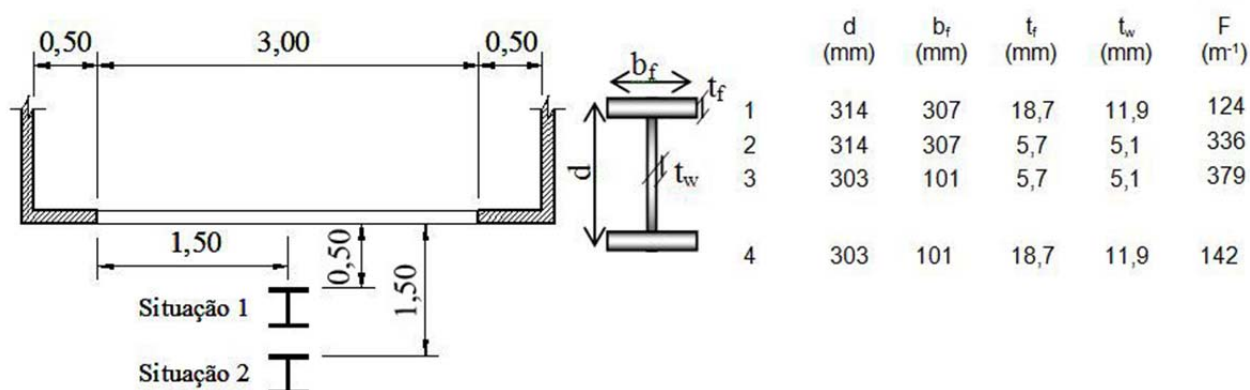


Figura 6: Posições do elemento estrutural e dimensões dos perfis estudados.

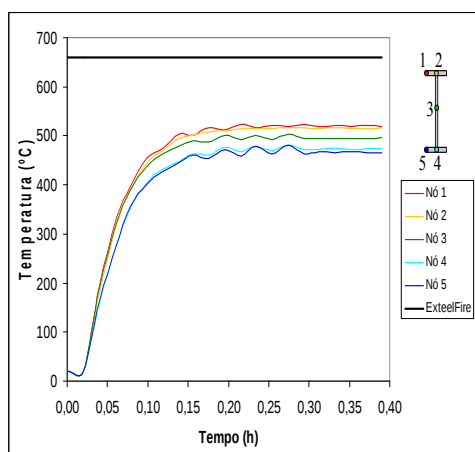


Figura 7: Variação da temperatura do aço em função do tempo na seção 3 a 0,5 m da abertura

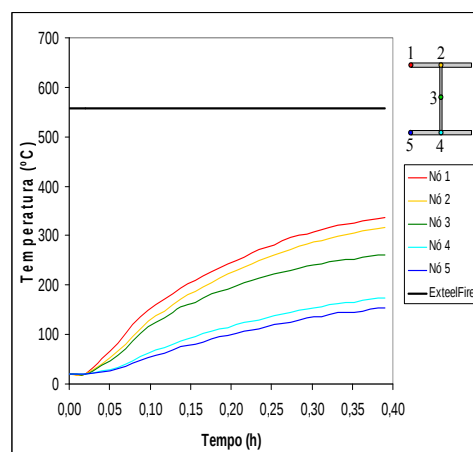


Figura 8: Variação da temperatura do aço em função do tempo na seção 1 a 1 m da abertura

Tabela 2: Temperatura máxima do pilar utilizando o Smartfire/SuperTempcalc e o ExteelFire.

Dimensões externas (mm)	Distância à janela (cm)	Fator de massividade (m ^{1/2})	Temperatura máxima	
			Smartfire/STC (°C)	ExteelFire (°C)
314 x 307	50	124	493*	641
		366	520	
	100	124	336*	558
		366	382	
303 x 101	50	142	499*	660
		379	519	
	100	142	326*	505
		379	368	

* Para um período de incêndio mais longo, esses valores seriam ligeiramente maiores.

5 Comparações a resultados experimentais

5.1 Ensaio em Dalmarnock

The Center for FireSafetyEngineeringattheUniversityof Edinburgh realizou uma série de ensaios de incêndio em escala natural, em 2006, em um edifício a ser demolido no distrito de Dalmarnock, Glasgow. O compartimento ensaiado tinha as dimensões constantes na figura 9. A carga de incêndio específica estimada foi de 32 kg/m^2 de madeira equivalente. No compartimento ensaiado as duas portas, da cozinha e do corredor, estavam abertas e, as janelas, fechadas.

Após 801 segundos da ignição, as janelas se quebraram, tornando o incêndio mais severo. A taxa de liberação de calor cresceu de um incêndio de estado quase estacionário a 3 MW, para um incêndio em torno de 5 MW, no instante em que a primeira janela do compartimento quebra (REIN, EMPISAND CARVEL, 2007).

Na figura 10 vê-se o modelo ensaiado no ExteelFire. Adotou-se carga de incêndio igual a 560 MJ/m^2 considerando-se o potencial calorífico da madeira igual a $17,5 \text{ MJ/kg}$. Na tabela 3 apresentam-se os resultados encontrados.

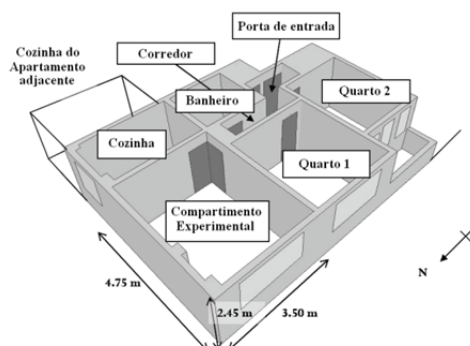


Figura 9: Layout do compartimento experimental.

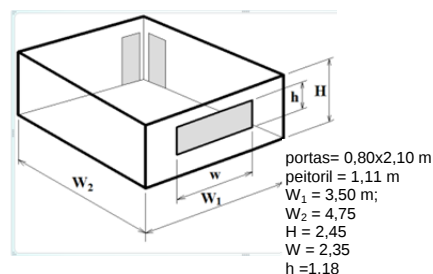


Figura 10: Model tested by ExteelFire.

Tabela 3: Comparação entre resultados do ExteelFire e ensaios em Dalmarnock

	ExteelFire		Dalmarnock
	ventilação externa por		
	janela e portas	apenas janela	
Taxa de liberação de calor	7,8 MW	4,7 MW	3 a 6 MW
Temperatura dentro do compartimento	896 °C	972 °C	740 °C
Altura da chama para 538 °C	1,30 m	1,82 m	0,21 m
Temperatura máxima da chama na janela	997 °C	1006 °C	800 °C

5.2 Ensaio em Ostrava

O teste foi realizado pela Czech Technical University em um edifício da Mittal Steel, em Ostrava, em 2006. O programa experimental investigou o comportamento estrutural global de um compartimento do edifício composto de estruturas de aço de três pavimentos que seria demolido (Figura 11). O compartimento ensaiado tinha 3,80 m x 5,95 m, com altura de 2,78 m. No compartimento havia uma abertura de 2,40 m x 1,40 m. No compartimento foram colocados caibros de madeira formando uma carga específica de incêndio de 1039 MJ/m². A experiência também permitiu estudar a transferência de calor para os elementos externos (WALD et al. 2009).

Na Figura 12, vê-se o modelo de compartimento ensaiado no ExteelFire e a localização da placa de aço em estudo. Na tabela 4 apresentam-se os resultados encontrados.

Tabela 4: Comparação entre resultados do ExteelFire e ensaio em Ostrava

Carga de incêndio específica	Ostrava 1039 MJ/m ²	ExteelFire 1039 MJ/m ²
Maior temperatura medida no interior do compartimento	1050 °C	1105 °C
Temperatura média medida no interior do compartimento	990 °C	
Temperatura da chama externa na altura do topo da abertura	573 °C	871 °C
Maior temperatura medida no aço	306 °C	441 °C
Temperatura média medida no aço	293 °C	



Figura 11: Edifício em que foi realizado o ensaio (WALD et al. 2009)

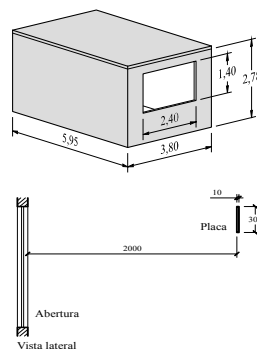


Figura 12: Modelo analisado no ExteelFire

6 Conclusões

- As temperaturas internas determinadas pelo ExteelFire são mais elevadas do que as do Smartfire (CFD) para compartimentos com uma só abertura; para duas aberturas, elas são menores somente em regiões muito pequenas em comparação ao volume do compartimento. A temperatura das chamas na janela e a altura das chamas fora do compartimento, calculadas pelo ExteelFire, são mais elevadas do que as determinadas pelo Smartfire. Como esperado, as seções mais delgadas alcançaram temperaturas mais altas do que as seções mais robustas. Não foi possível executar essa verificação via ExteelFire porque o fator da massividade não é considerado pelo modelo europeu, por admitir estado estacionário na temperatura máxima do gás.

- Nas análises numéricas, a temperatura da seção de aço dependeu mais da distância da abertura do que das dimensões da seção. As dimensões tiveram uma influência ligeiramente maior para distâncias maiores, isto é, quando a influência da fonte de calor era menor. As temperaturas determinadas pelo ExteelFire estão a favor da segurança em relação àqueles calculados pelos métodos numéricos, tornando insignificante o aumento da temperatura nas seções mais esbeltas. Os gradientes térmicos determinados via numérica são relevantes somente para as seções mais distantes, onde a temperatura é relativamente baixa.

- Os valores determinados pelo ExteelFire estão sempre a favor da segurança em relação àqueles medidos no ensaio de Dalmarnock ou de Ostrava.

Na Figura 13 é apresentada uma comparação de resultados. Em todas as comparações, os valores obtidos empregando o método europeu são favoráveis à segurança, ou, por outro lado, o método é antieconômico para as situações estudadas. É necessário continuar as investigações com novos ensaios e mais simulações numéricas a fim de bem calibrar o método procurando reduzir sua margem de segurança, tornando-o mais realístico.

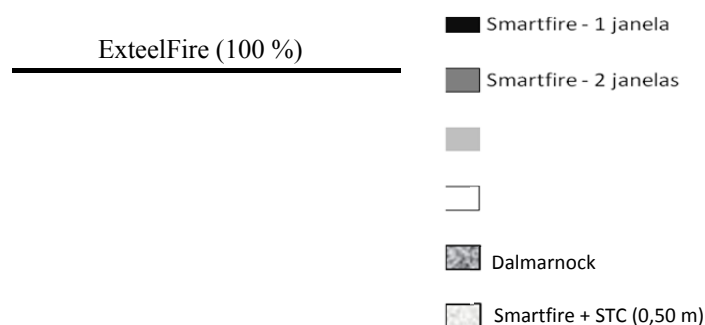


Figura 13: Comparação entre os resultados do ExteelFire aos resultados numéricos e experimentais.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CBCA – Centro Brasileiro de Construção em Aço, FDTE – Fundação para Desenvolvimento Tecnológico na Engenharia, CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e FAPESP - Fundação de apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Referências bibliográficas

- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION(2005).Design of steel structures, Part 1-2: General rules - Structural fire design. Eurocode 3. Brussels.
- SILVA, V. PIGNATTA (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process – a simple derivation. Engineering Structures, 27, p. 2036-2043.
- LAW, M. (1978). Fire safety of external building elements. The design approach. Engineering Journal. American Institute of Steel Construction, 2ⁿ Quarter, p. 59-74.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION(2002). Actions on structures, Part 1-2: General Actions – Actions on structures exposed to fire. Eurocode 1.Brussels.
- AZEVEDO, M.S. (2010). Estruturas de aço sem revestimento contra fogo externas de edifícios em incêndio. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE(1979). Fire-safe structural steel – A design guide. Washington.
- SILVA, V. PIGNATTA andAZEVEDO, M. S. (2009). Análise térmica de estruturas de aço externas a edificações, sem revestimento contra fogo. In Anais do VII Congresso de Construção Metálica e Mista,Lisboa.
- EWER, J.; JIA, F.; GRANDISON, A.; GALEA, E. and PATEL, M. (2004). SMARTFIRE 4.0 user guide and technical manual. Inglaterra: Fire Safety Engineering Group.
- EWER, J. (2008). Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, London. correspondênciapessoal.
- ANDERBERG, Y. (1997). TCD 5.0 - User's Manual. Fire Safety Design, Lund.
- REIN, G.; EMPIS, C. A. andCARVEL R. (2007). The Dalmarnock fires tests: experiments and modelling. School of Engineering and Electronics. University of Edinburgh.
- WALD, F.; CHLOUBA, J.; UHLIR, A.; KALLEROVA, P. andSTUJBEROVA, M. (2009). Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes. Fire safety journal, v. 44, p. 135-146.

Temperature of external structural steel elements of a building in fire. analysis of the european method

Abstract

Structural materials have their strength and modulus of elasticity reduced when subjected to high temperatures during a fire. The temperature field of the structures depends on the temperature-time curve of the hot gases in the compartment in fire. Generally, in tall buildings, the internal steel structure is protected by a fire protection. The fire protection thickness can be determined by specific tests or analysis (Eurocode 3 Part 1-2 2005, Silva 2005). The external structures reach lower temperatures than the internal ones and, if designed properly, the application of fire protection may be eliminated. The British researcher Margaret Law (Law 1978) proposed a method to determine the temperature in the external steel structures. This method, with minor modifications, was included in the European standards Eurocode 1, Part 1-2(2002) and Eurocode 3, Part 1-2 (2005). The temperature of an external structural steel element in a building, when engulfed in flames, can be determined by the thermal equilibrium in the form of Eq. (1). With due consideration and the simplifications proposed by the method, the Eurocode 3, Part 1-2 (2005) set up Eq. (12) for elements engulfed in flames and Eq. (13) for elements not engulfed in flames. From these equations it is possible to determine the value of the temperature of the external structural steel elements of buildings on fire. Given the large number of variables and equations involved, the authors developed a software called ExteelFire 2.0 (Azevedo 2010) to make the calculations. From input data such as design value of fire load, fire compartment geometry and the position of column or beams, it is possible to determine the temperature of the external structural steel elements of a building. Extensive comparisons with results obtained from another software developed by the authors in Mathcad, parametric sensitivity analysis and realistic physical situations were studied. All results were consistent with those expected (AZEVEDO, 2010). ExteelFire has been compared to various existing tools, such as Fires, a software developed by the University of Liège, Belgium, for ARBED Steel (now ArcelorMittal), and the tables of the American Iron and Steel Institute (1979), concluding that ExteelFire is more comprehensive and up-to-date than these tools (Azevedo 2010). The results of its application were compared to those obtained through numerical analysis, using computer programs such as Smartfire and Super Tempcalc and to those found in full-scale tests performed by Dalmarnock and Ostrava.

Keywords: Fire. Steel. External structure. Margaret Law.

Conclusions

- The temperature inside a fire compartment, as determined by ExteelFire, is higher than that determined by Smartfire (CFD) for single opening fire compartments; however, for two-opening fire compartments, the temperature is lower only in very small areas in comparison to the volume of the fire compartment. The flame temperature on the window and the height of the flames outside the fire compartment calculated by ExteelFire are higher than those established by Smartfire. As expected, the slender sections reached higher temperatures than the more robust ones. This result,

however, couldn't be verified through ExteelFire because the section factor is not considered by the European model, as it assumes a steady state of the maximum temperature of the gas.

- In numerical analysis, the temperature of the steel section depended more on the distance of the opening than on the dimensions of the section. The dimensions had a slightly greater influence on longer distances, i.e., when the influence of the heat source was lower. The temperatures determined by ExteelFire promote safety in relation to those calculated by numerical methods, making negligible the temperature rise in the more slender sections. The thermal gradients determined through numerical methods are relevant only to the more distant sections, where the temperature is relatively low.

- The values determined by ExteelFire are always in favor of safety when compared to those measured in the tests carried out at Dalmarnock and Ostrava.

Figure 13 shows a comparison of the results. In all comparisons, the values obtained using the European method is favorable to safety, but the method has, on the other hand, proved uneconomical for the situations studied. Further research must be carried out with new tests and more numerical simulations in order to better calibrate the method by seeking to reduce its safety margin and making it more realistic.