

## ANÁLISE TÉRMICA DE ESTRUTURAS DE AÇO EXTERNAS A EDIFICAÇÕES, SEM REVESTIMENTO CONTRA FOGO

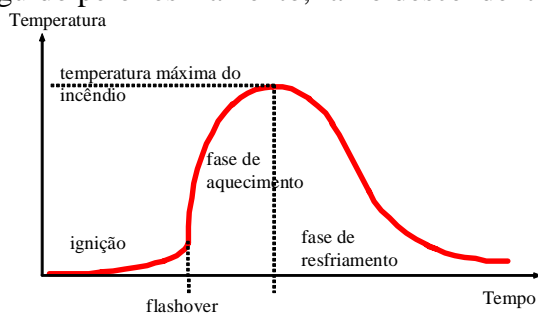
Valdir Pignatta Silva<sup>a</sup>, Macksuel Soares de Azevedo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil

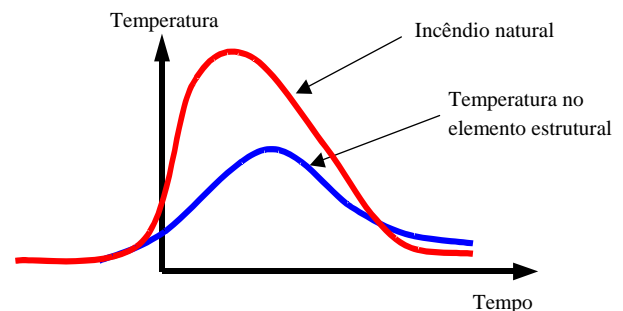
**Resumo.** Muitos edifícios modernos são construídos com estruturas de aço externas à fachada. Essas estruturas estarão sujeitas à maior ou menor ação térmica, dependendo do posicionamento dos seus elementos estruturais em relação às janelas ou aberturas. Os autores desenvolveram um programa de computador, Exteelfire 2.0, com base no método da pesquisadora britânica Margarete Law, que permite determinar a temperatura nos elementos estruturais, levando em consideração a carga de incêndio, as características dos ambientes e a posição da estrutura. Neste trabalho, são apresentados resultados de estudos desenvolvidos visando algumas situações correntes em que o revestimento contra fogo pode ser dispensado.

### 1 Introdução

Os materiais estruturais têm sua resistência e módulo de elasticidade reduzidos quando submetidos a temperaturas elevadas, em incêndio. A ação térmica de um incêndio está associada à curva temperatura-tempo dos gases quentes no ambiente em chama. Essa curva, conforme pode ser vista na figura 1, possui uma fase inicial de baixas temperaturas, que, apesar de ser uma fase de risco à vida devido à eventual exalação de gases tóxicos, não afeta a resistência dos materiais. A seguir, observa-se um ramo ascendente, fase de aquecimento, seguido pelo resfriamento, ramo descendente.



**Fig. 1:** Curva temperatura-tempo de um incêndio



**Fig. 2:** Temperatura no elemento estrutural em relação à do incêndio

No caso das estruturas de aço isoladas, a temperatura pode ser considerada uniforme no volume e a curva temperatura-tempo pode ser vista à figura 2, ou seja, segue a mesma forma, no entanto, com valores inferiores à curva dos gases quentes [1]. O valor relevante para a análise estrutural é a temperatura máxima da estrutura.

As estruturas externas ao ambiente em chamas atingem temperaturas menores do que as internas a ele. A pesquisadora britânica Margarete Law [2] propôs um método para se determinar a temperatura em estruturas externas de aço. Esse método, com pequenas modificações, foi incluído nas normas européias Eurocode [3, 4]. Seu uso é recomendado, embora sem detalhamento, pela norma brasileira ABNT NBR 14432:1999 [5]. Em vista do grande número de variáveis e equações envolvidas, os autores desenvolveram um programa de computador, Exteelfire 2.0 [6], e o aplicaram a situações correntes na construção civil concluindo que para algumas delas é possível dispensar o revestimento contra fogo.

## 2 O método

A temperatura de um elemento de aço externo à edificação, quando envolvido pela chama, pode ser determinada a partir do equilíbrio térmico (figura 3a) representado pela Eq. (1), cujas parcelas serão discriminadas 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 ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), em que  $\alpha_z$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção da chama ( $\text{kW}/\text{m}^2\text{°C}$ ),  $\theta_z$  é a temperatura da chama externa ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $\theta_a$  é a temperatura do aço ( $^{\circ}\text{C}$ ).

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

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

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

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

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

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

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

A Eq. (6) representa calor absorvido pelo elemento de aço na unidade de tempo por unidade de área superficial, em que  $\rho_a$  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, que será desprezada, a favor da segurança.

Substituindo-se as Eqs (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  $\phi_z = 1$  (devido ao aço estar imerso nas chamas) e desprezando-se  $\theta_o^4$  em relação à  $\theta_a^4$ , resulta a Eq. (8), que, simplificada, torna-se a Eq. (9).

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

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

Adotando-se  $\theta_g$  constante e igual ao seu valor máximo, Eq. (10) [2], anula-se a parcela à esquerda da Eq. (9), que inclui o fator de massividade da seção do perfil, resultando a Eq. (11).

$$\theta_g = 6000 (1 - e^{-0,1/\nu}) \nu^{-0,5} (1 - e^{-\chi}) + 20 \quad (10)$$

Onde:

$$\chi = \frac{A_f q_{fi,d}}{20 \sqrt{A_w A_t}}$$

$A_f$  é a área de piso do compartimento ( $m^2$ )

$q_{fi,d}$  é o valor de cálculo da carga de incêndio ( $MJ/m^2$ )

$A_w$  é a área de aberturas para o exterior ( $m^2$ )

$A_t$  é a área total (piso, teto, paredes) do compartimento ( $m^2$ )

$$\alpha_z [\theta_z - \theta_a] + \varepsilon_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f (1 - \varepsilon_z) \sigma (\theta_g + 273,15)^4 - \sigma (\theta_a + 273,15)^4 = 0 \quad (11)$$

Rearranjando a Eq (11), tem-se, finalmente a Eq. (12) que é a expressão recomendada pelo Eurocode 3 [4].

$$\sigma (\theta_a + 273,15)^4 + \alpha_z \theta_a = \varepsilon_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f (1 - \varepsilon_z) \sigma (\theta_g + 273,15)^4 + \alpha_z \theta_z \quad (12)$$

$\alpha_z$ ,  $\theta_z$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\phi_f$  devem ser determinados conforme instruções do Eurocode [2, 3]

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 (figura 3b):

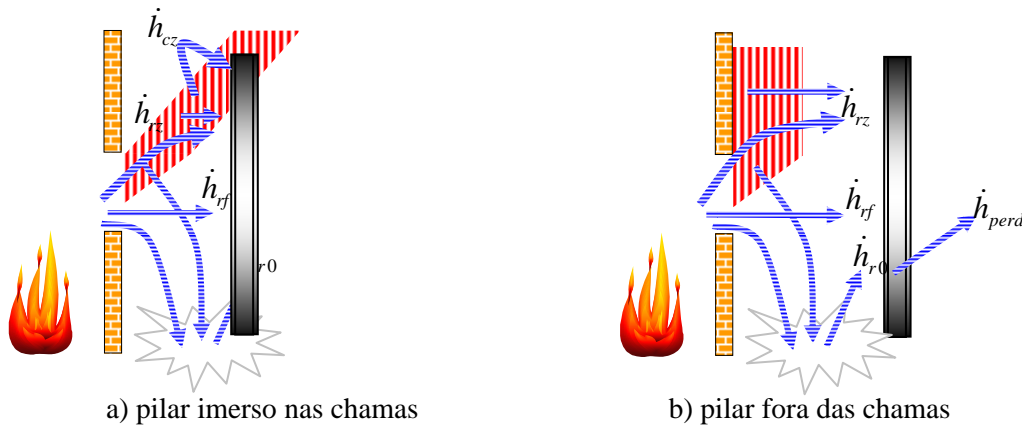
$\dot{h}_{cz} = 0$ , pois o elemento de aço está fora da chama

$\dot{h}_{perd} = \alpha_s (\theta_a - \theta_0)$  representa a intensidade de calor perdido pelo aço por convecção

Admitindo-se  $\varepsilon_a = 1$ ,  $\varepsilon_f = 1$ , desprezando-se  $\theta_0^4$  em relação à  $\theta_a^4$  e adotando-se  $\theta_g$  constante, tem-se a Eq. (13), que, rearranjada e aproximando 273,15 °C por 273 °C resulta na Eq. (14), que é a expressão recomendada pelo Eurocode 3 [4].

$$\varepsilon_z \phi_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f \sigma (\theta_g + 273,15)^4 - \sigma (\theta_a + 273,15)^4 - \alpha_a [\theta_a - \theta_o] = 0 \quad (13)$$

$$\sigma (\theta_a + 273,15)^4 + \alpha_a \theta_a = \varepsilon_z \phi_z \sigma (\theta_z + 273,15)^4 + \phi_f \sigma (\theta_g + 273,15)^4 + 293 \alpha_a = 0 \quad (14)$$



a) pilar imerso nas chamas

b) pilar fora das chamas

Fig. 3: Fluxo de calor para o perfil de aço

### 3 O programa Exteelfire 2.0

A fim de se resolver o grande número de equações e variáveis desenvolveu-se o programa de computador Exteelfire 2.0 [6] 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 (figura 4), é possível determinar-se a temperatura dos elementos estruturais de aço externos à edificação (figura 5).

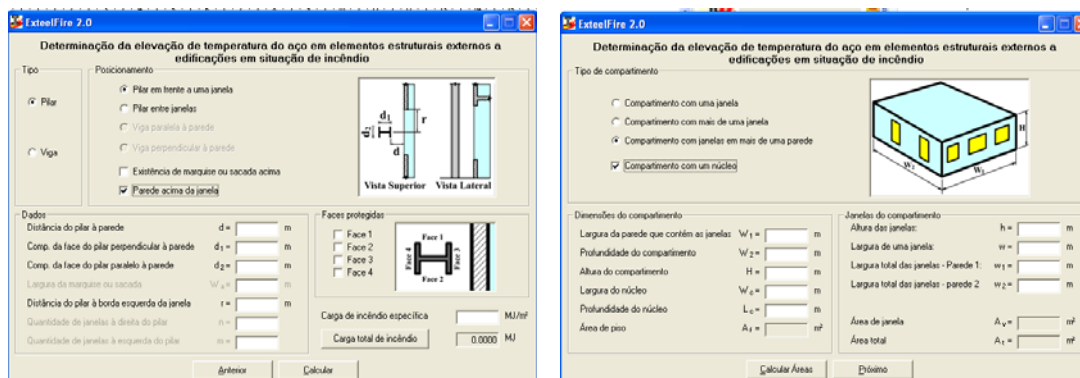


Fig. 4: Telas para entradas de dados no Exteelfire

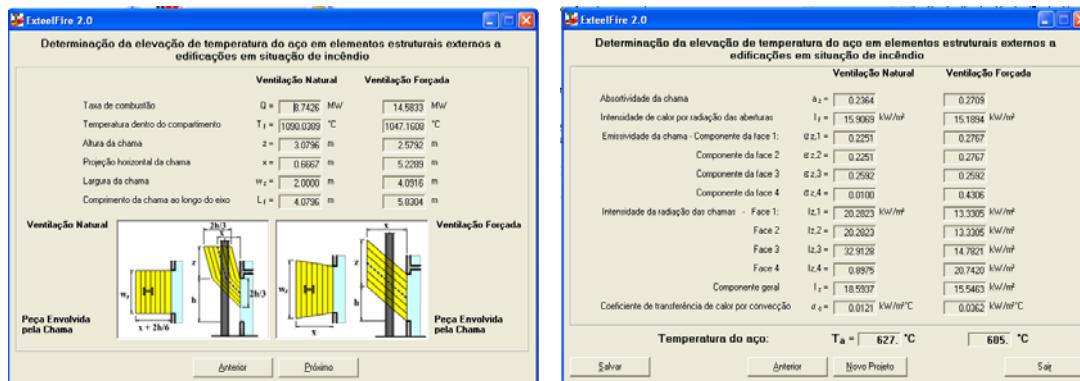


Fig. 5: Telas de saída de resultados

A título de exemplo, apresenta-se a variação da temperatura com alguns parâmetros intervenientes no processo para o modelo de compartimento apresentado na figura 6. Admitem-se as seguintes dimensões-padrão:  $W_1 = 8$  m,  $W_2 = 10$  m,  $H = 4$  m,  $h = 2$  m,  $w = 6$  m,  $d = 1$  m,  $d_1 = d_2 = 0,30$  m,  $q_{fi,d} = 700$  MJ/m<sup>2</sup>.

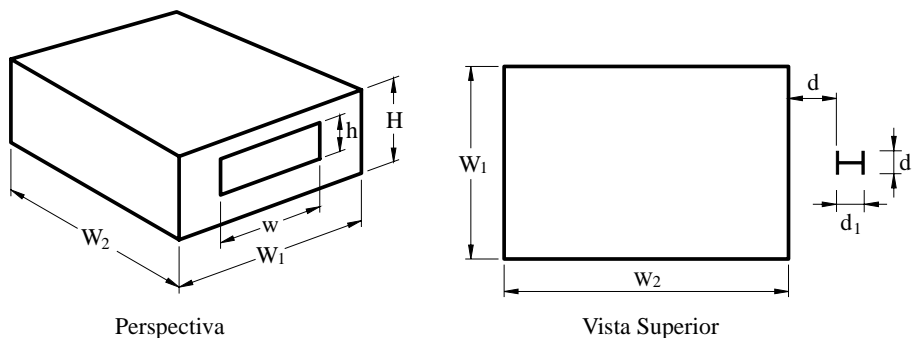
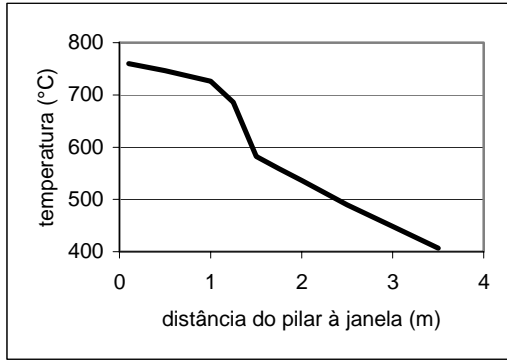
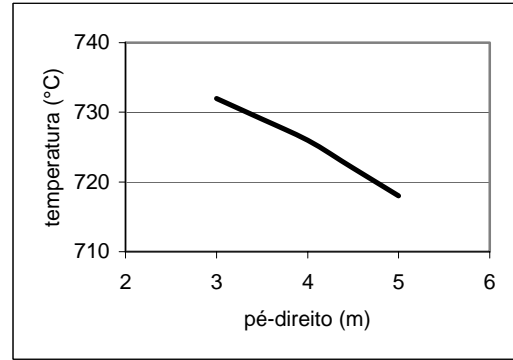


Fig. 6: Modelo do compartimento e do elemento estrutural para análise paramétrica

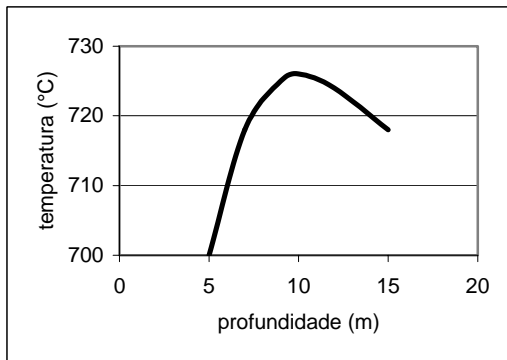
Na figura 7, observa-se a queda de temperatura num pilar, à medida que se afasta da janela. A queda brusca apresentada no gráfico significa a fase em que o pilar sai das chamas. Na figura 8, vê-se a variação da temperatura do pilar com a altura do compartimento. Com o aumento da altura do compartimento, aumenta-se a superfície total aquecida dentro do compartimento. A carga de incêndio total permanece inalterada, pois leva em consideração apenas a área de piso, ocasionando uma distribuição da mesma quantidade de calor em um volume maior do compartimento. Consequentemente, diminuem a temperatura no interior do compartimento e a intensidade de calor que o pilar recebe. Na figura 9, apresenta-se a variação da temperatura do pilar com o aumento da profundidade do compartimento. De início, ocorre o aumento da temperatura do pilar, o que era esperado em vista do aumento da carga de incêndio total. A profundidade e, portanto, a carga total de incêndio, vai aumentando até que a ventilação deixa de ser suficiente para a combustão. A combustão depende da carga de incêndio, mas também da ventilação. A partir daí, o aumento da carga de incêndio torna-se irrelevante e a ventilação vai relativamente diminuindo e, por consequência, a temperatura dentro do compartimento incendiado. Na figura 10, observa-se a variação da temperatura do pilar em relação à sua distância a uma das bordas da janela. Como é óbvio, a temperatura máxima ocorre quando o pilar é centrado na janela, diminuindo simetricamente à medida que o pilar se aproxima das bordas. Na figura 11, observa-se a redução na temperatura de um pilar cuja seção transversal tem largura igual à altura. Na figura 12, nota-se o aumento da temperatura do pilar com o valor de cálculo da carga de incêndio específica até um determinado valor a partir do qual a temperatura se estabiliza, pois o incêndio passa a ser controlado pela ventilação.



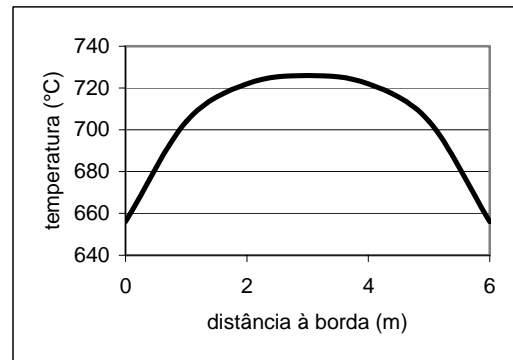
**Fig. 7:** Variação da temperatura de um pilar com a distância à janela



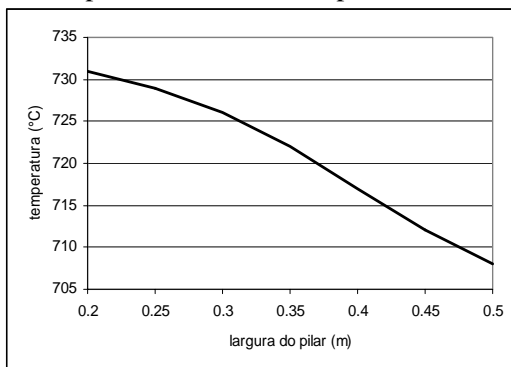
**Fig. 8:** Variação da temperatura de um pilar com a altura do compartimento



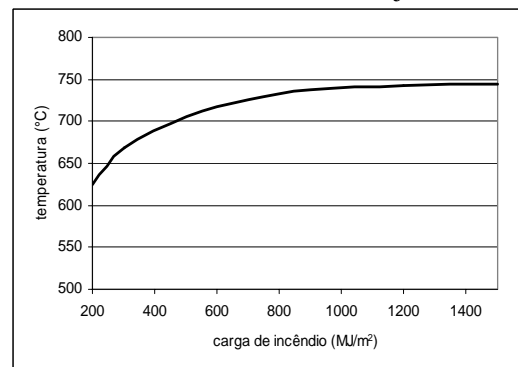
**Fig. 9:** Variação da temperatura de um pilar com a profundidade do compartimento



**Fig. 10:** Variação da temperatura de um pilar com a distância à borda da janela



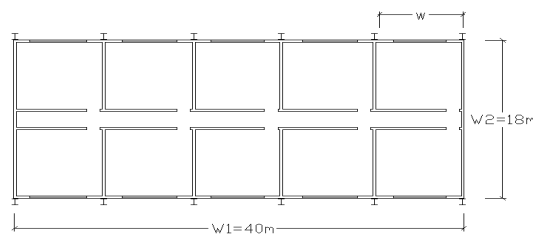
**Fig. 11:** Variação da temperatura de um pilar com sua largura



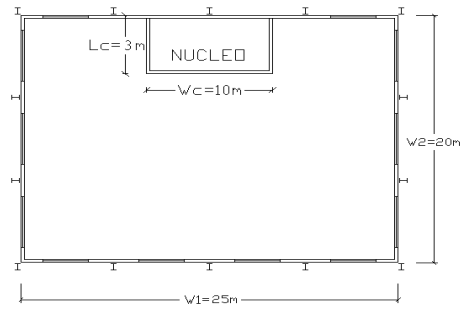
**Fig. 12:** Variação da temperatura de um pilar com a carga de incêndio de cálculo

## 4 Elementos de aço sem revestimento

A fim de se analisar a segurança do elemento de aço, deve-se comparar a temperatura calculada ( $\theta_a$ ) via Exteelfire 2.0 com a temperatura crítica ( $\theta_{cr}$ ) do elemento estrutural obtida, por exemplo, por meio de métodos simplificados normatizados [4, 5, 7]. Se  $\theta_a \leq \theta_{cr}$ , não é necessário o uso de revestimento contra fogo. Por simplicidade, alguns códigos permitem assumir  $\theta_{cr} = 550$  °C [8]. Nas tabelas 1 a 3 são apresentados os resultados do cálculo elaborado para dois tipos de edificações: uma escola (figura 13) e um edifício de escritórios (figura 14) com um núcleo com carga de incêndio muito baixa (escadas, elevador, etc.). Admitiu-se que os valores de cálculo das cargas de incêndio específicas são, respectivamente, iguais a  $300 \text{ MJ/m}^2$  e  $700 \text{ MJ/m}^2$ .

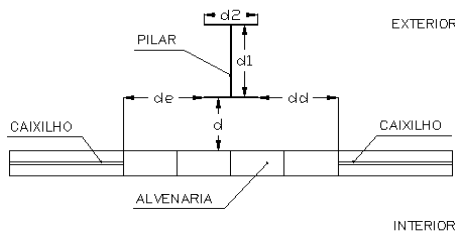


**Fig. 13:** Planta do pavimento tipo de escola

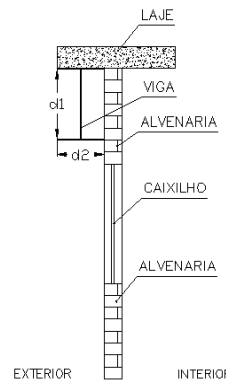


**Fig. 14:** Planta do pavimento tipo de um edifício de escritório

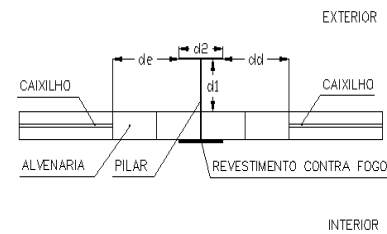
Foram analisadas as posições relativas de três perfis de aço para pilares nas situações 1 e 2 e três tipos de vigas na situação 3 (figuras 15 a 17). Para a situação 2, admitiu-se que não há transferência de calor da mesa revestida às demais partes do perfil. Para a situação 3, admitiu-se que as partes do perfil em contato com a laje e voltado para a parede não são aquecidos diretamente pelo incêndio.



**Fig. 15:** Posição do pilar na situação 1



**Fig. 16:** Posição da viga na situação 3.



**Fig. 17:** Posição do pilar na situação 2.

**Tabela 1:** Posicionamento de pilares conforme situação 1

Situação 1	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	H	h	w	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	d <sub>e</sub> =d <sub>d</sub>	d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	n	m	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[ ]	[ ]	
SALA DE AULA	300 x 200 <sup>(*)</sup>	40	18	3	1.5	6.4	32.0	32.0	0.55	0.0	0.30	0.20	2	3
		40	18	3	1.5	6.3	31.5	31.5	0.60	0.0	0.30	0.20	2	3
		40	18	3	1.5	6.1	30.5	30.5	0.70	0.0	0.30	0.20	2	3
		40	18	3	1.5	5.9	29.5	29.5	0.80	0.5	0.30	0.20	2	3
		40	18	3	1.5	5.7	28.5	28.5	0.90	0.5	0.30	0.20	2	3
	250 x 170 <sup>(*)</sup>	40	18	3	1.5	6.5	32.5	32.5	0.50	0.0	0.25	0.17	2	3
		40	18	3	1.5	6.4	32.0	32.0	0.55	0.0	0.25	0.17	2	3
		40	18	3	1.5	6.3	31.5	31.5	0.60	0.0	0.25	0.17	2	3
		40	18	3	1.5	5.8	29.0	29.0	0.85	0.5	0.25	0.17	2	3
		40	18	3	1.5	5.7	28.5	28.5	0.90	0.5	0.25	0.17	2	3
200 x 130 <sup>(*)</sup>	40	18	3	1.5	6.6	33.0	33.0	0.45	0.0	0.20	0.13	2	3	
	40	18	3	1.5	6.5	32.5	32.5	0.50	0.0	0.20	0.13	2	3	
	40	18	3	1.5	6.3	31.5	31.5	0.60	0.0	0.20	0.13	2	3	
	40	18	3	1.5	5.8	29.0	29.0	0.85	0.5	0.20	0.13	2	3	
	40	18	3	1.5	5.7	28.5	28.5	0.90	0.5	0.20	0.13	2	3	

**Tabela 1:** Posicionamento de pilares conforme situação 1 (cont.)

Situação 1		W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	H	h	w	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	d <sub>e</sub> =d <sub>d</sub>	d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	n	m
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[ ]	[ ]
ESCRITÓRIO	300 x 200 <sup>(*)</sup>	25	20	3	1.5	5.95	23.80	17.91	0.70	0.0	0.3	0.2	2	2
		25	20	3	1.5	5.95	23.80	17.76	0.75	0.0	0.3	0.2	2	2
		25	20	3	1.5	5.95	23.80	17.61	0.80	0.0	0.3	0.2	2	2
		25	20	3	1.5	5.45	21.80	15.66	0.95	0.5	0.3	0.2	2	2
		25	20	3	1.5	5.45	21.80	15.51	1.00	0.5	0.3	0.2	2	2
		25	20	3	1.5	5.45	21.80	15.36	1.05	0.5	0.3	0.2	2	2
	250 x 170 <sup>(*)</sup>	25	20	3	1.5	6.00	24.00	18.06	0.65	0.0	0.25	0.17	2	2
		25	20	3	1.5	6.00	24.00	17.91	0.70	0.0	0.25	0.17	2	2
		25	20	3	1.5	5.50	22.00	15.66	0.95	0.5	0.25	0.17	2	2
		25	20	3	1.5	5.50	22.00	15.51	1.00	0.5	0.25	0.17	2	2
		25	20	3	1.5	5.50	22.00	15.36	1.05	0.5	0.25	0.17	2	2
		25	20	3	1.5	6.05	24.20	18.36	0.55	0.0	0.20	0.13	2	2
	200 x 130 <sup>(*)</sup>	25	20	3	1.5	6.05	24.20	18.21	0.60	0.0	0.20	0.13	2	2
		25	20	3	1.5	6.05	24.20	17.91	0.70	0.0	0.20	0.13	2	2
		25	20	3	1.5	5.55	22.20	15.66	0.95	0.5	0.20	0.13	2	2
		25	20	3	1.5	5.55	22.20	15.51	1.00	0.5	0.20	0.13	2	2
		25	20	3	1.5	5.55	22.20	15.36	1.05	0.5	0.20	0.13	2	2
		25	20	3	1.5	5.55	22.20	15.36	1.05	0.5	0.20	0.13	2	2

(\*) dimensões de um retângulo que circunscreva um perfil de aço

**Tabela 2:** Posicionamento de pilares conforme situação 2

Situação 2		W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	H	h	w	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	d <sub>e</sub> =d <sub>d</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	n	m
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[ ]	[ ]
ESCOLA	250 x 170	40	18	3	1.5	6.7	33.5	33.5	0.40	0.15	0.20	2	3
		40	18	3	1.5	6.6	33.0	33.0	0.45	0.15	0.20	2	3
		40	18	3	1.5	6.8	34.0	34.0	0.35	0.10	0.17	2	3
		40	18	3	1.5	6.7	33.5	33.5	0.40	0.10	0.17	2	3
		40	18	3	1.5	7.0	35.0	35.0	0.25	0.05	0.13	2	3
		40	18	3	1.5	6.9	34.5	34.5	0.30	0.05	0.13	2	3
ESCRITÓRIO	300 x 200	25	20	3	1.5	6.1	24.40	18.36	0.55	0.15	0.20	2	2
		25	20	3	1.5	6.1	24.40	18.21	0.60	0.15	0.20	2	2
	250 x 170	25	20	3	1.5	6.2	24.60	18.66	0.45	0.10	0.17	2	2
		25	20	3	1.5	6.2	24.60	18.51	0.50	0.10	0.17	2	2
	200 x 130	25	20	3	1.5	6.2	24.80	18.81	0.40	0.05	0.13	2	2
		25	20	3	1.5	6.2	24.80	18.66	0.45	0.05	0.13	2	2
25	20	3	1.5	6.2	24.80	18.51	0.50	0.05	0.13	2	2		

**Tabela 3:** Posicionamento de vigas conforme situação 3

Situação 3		W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	H	h	w	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>v</sub>
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
ESCOLA	I 400 x 200	40	18	3	1.5	40	40	40	0.20	0.40	0.00
		40	18	3	1.5	40	40	40	0.20	0.40	0.05
		40	18	3	1.5	40	40	40	0.20	0.40	0.10
		40	18	3	1.5	40	40	40	0.20	0.40	0.20
		40	18	3	1.5	40	40	40	0.20	0.40	0.30
		40	18	3	1.5	40	40	40	0.20	0.40	0.40
	I 350 x 175	40	18	3	1.5	40	40	40	0.18	0.35	0.00
		40	18	3	1.5	40	40	40	0.18	0.35	0.05
	I 300 x 150	40	18	3	1.5	40	40	40	0.15	0.30	0.05
	I 400 x 200	25	20	3	1.5	25	25	20	0.20	0.40	0.15
		25	20	3	1.5	25	25	20	0.20	0.40	0.20
	I 350 x 175	25	20	3	1.5	25	25	20	0.18	0.35	0.15
		25	20	3	1.5	25	25	20	0.18	0.35	0.20
	I 300 x 150	25	20	3	1.5	25	25	20	0.15	0.30	0.15
		25	20	3	1.5	25	25	20	0.15	0.30	0.20

Onde:

$W_1$  é a largura da parede que contém as janelas;

$W_2$  é a profundidade do compartimento;

$H$  é a altura do compartimento;

$h$  é a altura da janela;

$w$  é a largura de uma janela;

$w_1$  é a largura total das janelas da parede 1;

$w_2$  é a largura total das janelas da parede 2;

$d_e$  é a distância do pilar à janela esquerda;

$d_d$  é a distância do pilar à janela direita;

$d$  é a distância do pilar à parede;

$d_1$  é o comprimento da face do pilar perpendicular à parede;

$d_2$  é o comprimento da face do pilar paralela à parede;

$n$  é a quantidade de janelas à direita do pilar;

$m$  é a quantidade de janelas à esquerda do pilar;

$d_v$  é a distância segura da viga em relação ao topo da janela.

As vigas e pilares que respeitarem as dimensões indicadas nas tabelas 1 a 3 e as hipóteses que nortearam a sua construção, fornecidas no início deste item 4, podem prescindir de revestimento contra fogo.

## 5 Conclusões

Os elementos estruturais de aço externos a uma edificação em incêndio atingem temperaturas inferiores aos internos. Dependendo da posição desses elementos, o revestimento contra fogo pode ser prescindido. O mais conhecido método analítico para a determinação da temperatura do aço nessas condições é o método proposto por M. Law e consagrado nas normas Eurocode. Em vista da grande quantidade de equações e variáveis envolvidas nesse cálculo, elaborou-se o programa de computador Exteelfire 2.0. Empregando-se esse programa, é possível estudar-se a posição mais adequada dos elementos estruturais a fim de dispensar o revestimento contra fogo.

Efetou-se, a título de exemplo de aplicação, uma análise da influência de alguns dos parâmetros envolvidos na determinação da temperatura do aço. Apresentaram-se, também, tabelas indicando valores que, se seguidos, permitirão dispensar o revestimento contra fogo em algumas situações típicas de projetos de estruturas de aço.

## 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

- [1] Silva, V. Pignatta, Determination of the Temperature of Thermally unprotected Steel Members under Fire Situations: considerations on the Section Factor, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 3, p 113 – 125, São Paulo, 2006.
- [2] Law, M. Fire safety of external building elements. The design approach. *Engineering Journal*. American Institute of Steel Construction, 2<sup>n</sup> Quarter, p. 59-74, 1978.
- [3] European Committee for Standardization. Actions on structures, Part 1-2: General Actions – Actions on structures exposed to fire. *Eurocode 1*. Brussels, 2002.
- [4] European Committee for Standardization. Design of steel structures, Part 1-2: General rules – Structural fire design. *Eurocode 3*. Brussels, 2003.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro, 1999.
- [6] Azevedo, M. S., Murakami, A. Silva, V. Pignatta. Segurança das estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio. p. 295 - 301. *Revista Escola de Minas* 60 (2). Ouro Preto. 2007.
- [7] Silva, V. Pignatta. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. 1. ed. (reimpr.). Zigurate. São Paulo. 2004.
- [8] Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo. *Instrução Técnica n. 08: Segurança estrutural nas edificações: resistência ao fogo dos elementos de construção*. São Paulo, 2004.