

Análise numérica da elevação de temperatura em seções transversais de elementos estruturais em situação de incêndio

Ronaldo Rigobello⁽¹⁾, Jorge Munaiar Neto⁽²⁾, Valdir Pignatta e Silva⁽³⁾

Trabalho recebido em 21/11/2007 e aprovado para publicação em 15/12/2009.

Resumo

O presente trabalho aborda estudos com relação à elevação de temperatura em seções transversais de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto, quando expostos ao modelo de incêndio-padrão ISO 834. Trata-se de trabalho em caráter essencialmente numérico, o qual utiliza o código computacional ANSYS v9.0 com o objetivo de avaliar as equações propostas pelo método simplificado de cálculo da NBR 14323:1999, cujas prescrições têm como base o Eurocode. Serão consideradas, em especial, situações de não ocorrência de aquecimento uniforme por todos os lados do elemento. A determinação dos níveis de temperatura em seções transversais de elementos estruturais, obtidas com base nas prescrições da NBR 14323:1999, conduz a resultados satisfatórios, porém, com temperaturas próximas às temperaturas máximas obtidas numericamente. Para os casos usuais na prática da construção civil, não contemplados pela NBR 14323:1999, fica evidente, após a análise dos resultados, a necessidade do emprego de método avançado de cálculo ou de desenvolvimento de ferramentas analíticas para emprego em tais situações.

Palavras-chave: Incêndio. Estruturas de aço. Estruturas mistas. Análise térmica. Análise numérica.

⁽¹⁾ Doutorando em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São-carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos - SP, Brasil, tel. +55 16 3373-9457, fax. +55 16 3373-9482, e-mail: ronbello@gmail.com

⁽²⁾ Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São-carlense 400, CEP 13566-590, São Carlos - SP, Brasil, tel. +55 16 3373-9487, fax. +55 16 3373-9482, e-mail: jmunaiar@sc.usp.br

⁽³⁾ Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 271 Cid. Universitária, São Paulo - SP, Brasil, tel. +55 11 30915562; fax. +55 11 3091-5181, e-mail: valpigss@usp.br, web: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir>

1 Introdução

Na engenharia de estruturas em situação de incêndio é reconhecido o fato de as prescrições normativas, com base em ensaios de elementos isolados em fornos, conduzirem a projetos anti-econômicos. Por essa razão, no contexto internacional, a regulamentação de segurança contra incêndio em edificações passa a tomar por base o desempenho dos elementos estruturais das edificações expostos a situação de incêndios reais.

Os avanços ocorridos no contexto mundial com relação ao entendimento do desempenho de estruturas em altas temperaturas e as maiores exigências quanto à segurança em situação de incêndio, por parte do Corpo de Bombeiros nos grandes centros, têm estimulado, no Brasil, estudos relacionados à “*Segurança em situação incêndio*” com destaque ao desempenho das estruturas.

No presente texto apresenta-se os resultados do estudo da elevação de temperatura em seções transversais de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto, quando expostos ao modelo de incêndio-padrão ISO 834 (1999). Tal trabalho, que possui caráter essencialmente numérico e utiliza o código ANSYS v9.0 (Ansys Inc. 2004), objetiva avaliar a resposta das equações propostas pelo método simplificado de cálculo da NBR 14323:1999, cujas prescrições têm como base o Eurocode 3. Serão consideradas, em especial, aquelas situações de não ocorrência de aquecimento uniforme por todos os lados do elemento. Os resultados aqui apresentados têm origem no trabalho desenvolvido em Regobello (2007).

2 Elevação de temperatura em elementos estruturais

Os modelos de cálculo que permitem obter a evolução da temperatura dividem-se, basicamente, em *modelos simplificados* e *modelos avançados*. Os *modelos simplificados de cálculo* permitem obter a elevação de temperatura de modo homogêneo para toda a seção transversal e ao longo do comprimento do elemento de interesse, por meio de equações analíticas. Os *modelos avançados de cálculo* têm como base métodos numéricos como, por exemplo, diferenças finitas e elementos finitos, e permitem obter o campo de temperaturas no elemento ao longo do processo de aquecimento.

2.1 Modelos simplificados de cálculo

2.1.1 Hipótese de temperatura homogênea na seção

Para casos correntes de elementos de aço e mistos de aço e concreto expostos ao fogo por todos os lados, com ou sem revestimento, simples soluções analíticas podem ser obtidas possibilitando o cálculo da evolução de temperaturas de forma direta. Em Wang (2002) destaca-se que essas soluções analíticas foram desenvolvidas lançando-se

mão do “*Método da Massa Concentrada*”, em que toda massa do aço é sujeita a mesma temperatura. Essa hipótese depende da taxa de transferência de calor intrínseca ao material, isto é, de sua condutividade térmica e de sua espessura.

Nos perfis de aço usualmente empregados na construção civil, as espessuras das almas, das mesas ou das chapas de aço constituintes destes perfis resultam, em geral, bem menores que o valor necessário para a consideração dessa hipótese. Portanto, o “*Método da Massa Concentrada*” pode ser aplicado e a hipótese de temperatura homogênea na seção resulta coerente e representativa.

2.1.2 Temperatura em elementos não-revestidos

A Eq. (1) é adotada pela NBR 14323:1999 para obtenção da elevação de temperatura em elementos não-revestidos, onde $\Delta\theta_{a,t}$ representa a variação da temperatura (em °C) no elemento estrutural de aço durante um intervalo de tempo Δt (em s), e u/A é o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem revestimento contra fogo, com unidade em m^{-1} .

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{(u/A)}{c_a \rho_a} \phi \Delta t \quad (1)$$

Ainda com relação à Eq. (1), u é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço (m), A é a área da seção transversal do elemento estrutural (m^2), c_a é o calor específico do aço ($J/kg^\circ C$), ρ_a é a massa específica do aço (kg/m^3) e ϕ é o fluxo de calor por unidade de área (W/m^2).

A Eq. (1) difere basicamente daquela apresentada pelos Eurocodes 3 (2005) e Eurocode 4 (2005), no referente à introdução de um fator de correção, para considerar o efeito de sombra, representado por k_{sh} (“k shadow”), causado pela obstrução local à radiação térmica devido ao formato do perfil de aço. O efeito sombra tem influência em perfis de formato côncavo (ou próximo dessa forma), tais como **seções do tipo I**.

Para seções transversais de formato convexo, tais como **seções dos tipos caixa e circulares vazadas** completamente envolvidas pelo incêndio, o efeito de sombra não tem influência e o fator de correção k_{sh} deve ser tomado igual à unidade.

Em Vila Real (2003) afirma-se que a não consideração do efeito de sombra na Eq. (1), isto é, admitir $k_{sh}=1$, conduz a resultados conservadores. O Eurocode 3 recomenda, no caso do aço-carbono, usar o valor 0,7 para o produto entre a emissividade das chamas (ε_p) e a emissividade do material (ε_m), em contraste com valor igual 0,5 adotado para a emissividade resultante ε_{res} , conforme NBR 14323:1999.

2.1.3 Temperatura em elementos com revestimento contra fogo

A Eq. (2) corresponde àquela adotada pela NBR 14323:1999, pelo Eurocode 3 - Part 1.2 e pelo Eurocode 4 - Part 1.2, para os casos de elementos com revestimento contra fogo.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m (u_m / A) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{t_m c_a \rho_a} \frac{\Delta t}{1 + \frac{\xi}{3}} - (e^{\xi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{c_m \rho_m}{c_a \rho_a} t_m (u_m / A) \quad (3)$$

Para as Eq. (2) e (3), u_m/A é o fator de massividade para elementos estruturais envolvidos por material de revestimento contra incêndio (m^{-1}), em que u_m é o perímetro efetivo do material de revestimento contra fogo (igual ao perímetro da face interna do material de revestimento contra incêndio mais metade dos afastamentos desta face ao perfil de aço, em metro), A é a área da seção transversal do elemento estrutural (m^2), c_m é o calor específico do material de revestimento incêndio ($J/kg^\circ C$), $\theta_{a,t}$ é a temperatura do aço no tempo t ($^\circ C$) e $\theta_{g,t}$ é a temperatura dos gases no tempo t ($^\circ C$).

Com relação às demais variáveis de interesse, t_m , λ_m e ρ_m são, respectivamente, a espessura (m), a condutividade térmica ($W/m^\circ C$) e a massa específica (kg/m^3) do material de revestimento contra fogo e Δt é o intervalo de tempo compatível (≤ 30 s) com a precisão adequada no cálculo da temperatura.

Vale mencionar que a NBR 14323:1999 atualmente encontra-se em processo de revisão e em substituição a Eq. (2), o Projeto de Revisão da NBR 14323:1999 prescreve a Eq. (4), proposta em Silva (2005).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m (u_m / A) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{t_m c_a \rho_a} \frac{\Delta t}{1 + \frac{\xi}{4}} - \frac{\Delta\theta_{g,t}}{\frac{4}{\xi} + 1} \quad (4)$$

2.2 Modelos avançados de cálculo

Modelos avançados de cálculo têm, geralmente, como base métodos numéricos como o método das diferenças finitas e, principalmente, o método dos elementos finitos, e permitem obter o campo de temperaturas no elemento durante o processo de aquecimento. Nesse contexto, citam-se os códigos denominados “especialistas”, tais como o SUPERTEMPLCALC (TCD), o SAFIR, entre outros. A análise de transferência de calor também pode ser realizada por meio de vários outros pacotes comerciais elaborados com base no método dos elementos finitos como o ANSYS, ABAQUS, ADINA ou DIANA, todos conhecidos mundialmente.

3 Aspectos sobre a modelagem numérica

3.1 Elementos finitos utilizados

Na elaboração dos modelos numéricos aqui apresentados foram utilizados dois tipos de elementos finitos (Figura 1): o PLANE77 (plano) para modelar a seção transversal da viga de aço e o material de revestimento, bem como o SURF151 (de superfície) para aplicar ao modelo as condições de contorno, representativas da ação térmica, referentes à convecção e à radiação.

3.2 Aplicação da ação térmica

Para aplicação dos efeitos térmicos (convecção e radiação) nos modelos numéricos, o elemento SURF151 (Figura 1b) é utilizado com a opção do nó extra. Com a aplicação de temperatura diretamente ao nó extra é possível simular a temperatura dos gases quentes do ambiente em situação de incêndio.

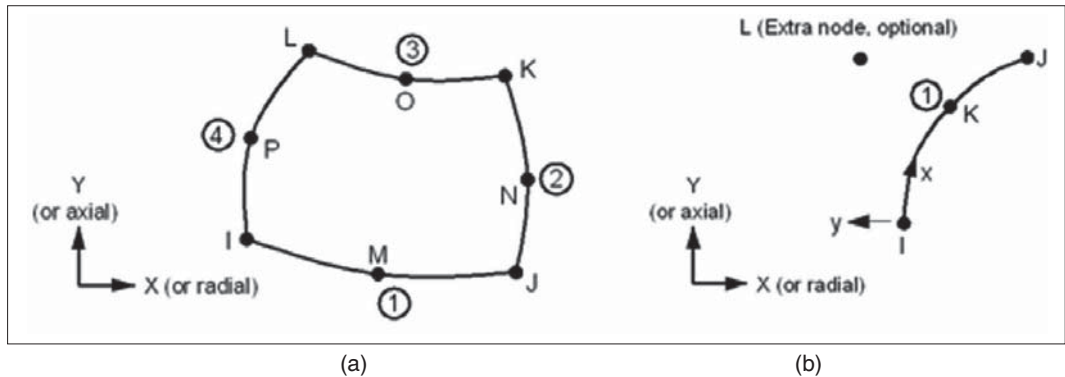


Figura 1: (a) Elemento Finito PLANE77 e (b) Elemento Finito SURF151

Para aplicação dos efeitos de *convecção* no contorno do modelo é necessário fornecer o coeficiente de transferência de calor por convecção (α_c). Dessa forma, o cálculo do fluxo de calor devido à convecção (φ_c) em W/m^2 na superfície exposta do modelo é feito com base na diferença entre a temperatura dos gases quentes do ambiente (θ_g) e a temperatura na superfície do modelo (θ_a), conforme Eq. (5).

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (5)$$

Com relação aos efeitos da **radiação térmica**, para o cálculo do fluxo de calor devido à radiação (φ_r) é necessário fornecer a emissividade resultante (ϵ_{res}), a constante de *Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) e o fator de configuração (Φ). Como hipótese

simplificadora, nas aplicações em segurança contra incêndio, é assumido que os gases da combustão e os elementos estruturais estejam em contato direto, de modo que esse fenômeno pode ser tratado como o caso de duas superfícies (placas) infinitas. Nesse caso, o fator de configuração resulta, por definição, igual à unidade.

No caso de se optar por trabalhar com a escala de temperatura em grau Celsius, é necessário fornecer ao programa ANSYS a diferença entre o zero da escala Celsius e o zero absoluto (escala Kelvin), no caso, igual a 273. Assim, o fluxo de calor devido à radiação em W/m^2 na superfície do elemento estrutural passa a ser dado pela Eq. (6).

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{\text{res}} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (6)$$

3.3 Validação da estratégia numérica

Por meio do ANSYS foram reproduzidos modelos presentes na literatura técnica, cujos resultados foram comparados a resultados do SAFIR, do PFEM_2D e do SUPER-TEMPCALC. Tais resultados, referentes à validação da estratégia numérica podem ser vistos em Regobello (2007).

4 Estudo de casos e resultados obtidos

Nas tabelas que seguem são descritas e esquematizadas as situações consideradas para fins de análise em temperaturas elevadas, casos esses de interesse em situação de incêndio. Para cada caso analisado, a elevação de temperatura é obtida considerando-se quatro perfis do tipo I previamente escolhidos, contemplando, com vistas a fatores de massividade, uma faixa entre 50 e 400 m^{-1} , cujas características são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Perfis adotados para os casos analisados

Tipo do Perfil	d (mm)	b _f (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	u (m)	A (cm ²)	u/A (m ⁻¹)
W 150x13	148	100	4,9	4,3	0.67	16.6	404
W 250x25,3	257	102	8,4	6,1	0.89	32.6	273
VS 400x78	400	200	19	6,3	1.59	98.8	161
CS 550x502	550	550	45	31,5	3.24	639.9	51

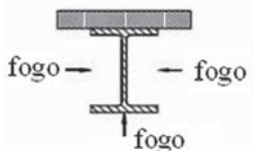
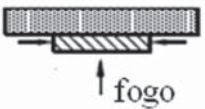
u – perímetro da seção; A – área da seção; u/A – fator de massividade

Com relação à geometria das lajes de concreto, se considera espessura com valor igual a 10 cm e comprimento com valor igual a três vezes a largura das mesas dos perfis. Para as alvenarias, se considera espessura igual a 10 cm e comprimento igual à

largura da mesa do perfil. As propriedades térmicas do aço, do concreto e da alvenaria estão de acordo com as informações apresentadas em Regobello (2007). Para as alvenarias, as propriedades térmicas correspondem àquelas de blocos cerâmicos de tijolo vazado.

Nas tabelas 2 e 3 são descritas e esquematizadas situações consideradas em que são considerados *casos normatizados* e *não-normatizados*, respectivamente. Nessas mesmas tabelas estão indicados o tipo de elemento analisado e o esquema admitido de exposição ao fogo, considerando a elevação da temperatura dos gases de acordo com a curva ISO 834.

Tabela 2: Descrição e esquematização de casos normatizados (NBR 14323:1999)

CASO 1 - Seção aberta exposta ao incêndio por três lados	CASO 2 - Chapa exposta ao incêndio por três lados	CASO 3 - Mesa de seção I exposta ao incêndio por três lados
		
CASO 4 - Seção I com reforço em caixão exposta ao incêndio por todos os lados	CASO 5 - Seção I com proteção tipo caixa, de espessura uniforme, exposta ao incêndio por todos os lados	CASO 6 - Seção I com proteção tipo caixa, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados

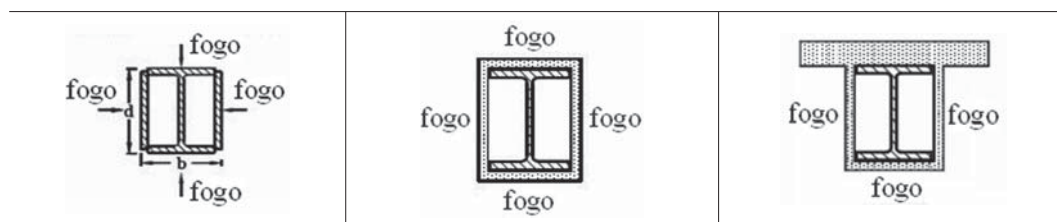
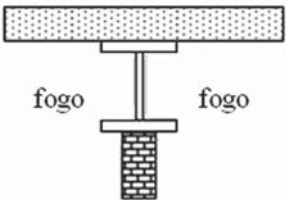
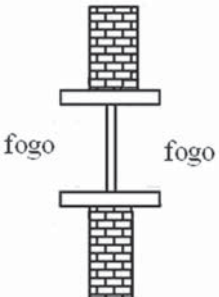
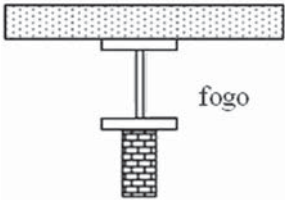
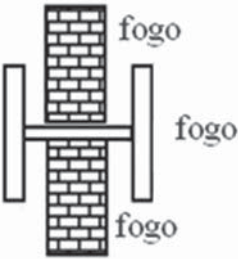


Tabela 3: Descrição e esquematização dos casos não-normatizados (situações usuais)

CASO 7 - Viga I em contato com laje de concreto e alvenaria, exposta ao incêndio pelos dois lados da parede de alvenaria	CASO 8 - Pilar com mesas em contato com paredes de alvenaria, exposta ao incêndio pelos dois lados da parede de alvenaria	CASO 9 - Viga I em contato com laje de concreto e alvenaria, exposta ao incêndio em apenas um lado da parede de alvenaria
		
CASO 10 - Pilar com mesas em contato com paredes de alvenaria, exposta ao incêndio em apenas um lado da parede de alvenaria	CASO 11 - Pilar com alma em contato com paredes de alvenaria, exposta ao incêndio em apenas um lado da parede de alvenaria	
		

4.1 Considerações sobre as condições de contorno e malha de elementos finitos

Seguindo a estratégia adotada em Lewis (2000), em todos os modelos a emissividade resultante ε_{res} adotada tanto para o aço quanto para o concreto, bem como para

a alvenaria e para os materiais de proteção, foi igual a 0,5. Lembra-se que a NBR 14323:1999 menciona apenas o valor igual a 0,5 para a emissividade resultante do aço.

O coeficiente de transferência de calor por convecção (α_c) foi tomado igual a 25 W/m²°C, conforme prescrito pela NBR 14323:1999. A favor da segurança, a face da laje não-exposta ao fogo foi aqui considerada como parede adiabática, exceto para os casos de 9 a 11 (Tabela 3), em que a troca de calor entre as superfícies não-expostas ao incêndio e o meio é considerada por meio de um coeficiente α_c igual a 9 W/m²°C, conforme uma das recomendações do Eurocode 1 (2002).

Na discretização dos perfis de aço procurou-se manter elementos finitos com tamanho máximo igual a 7 mm, para obtenção de malha suficientemente refinada. Como as lajes e alvenaria são elementos secundários nas análises aqui efetuadas procurou-se apenas compatibilizar as malhas na interface perfil-alvenaria e perfil-laje, não adotando uma malha rigorosamente refinada para essas partes do modelo, porém, com grau de discretização, apesar de simplificado, suficiente para a obtenção dos resultados de interesse do trabalho.

São apresentados a seguir os resultados referentes ao **Caso 1** (normatizado, tabela 2), bem como os **Casos 7, 9 e 10** (não-normatizados, tabela 3). Os demais casos, cujos resultados não são aqui apresentados, podem ser encontrados em Regobello (2007).

CASO 1 - Seção aberta e exposta ao incêndio por três lados

A Figura 2 ilustra a malha de elementos finitos e o campo de temperaturas para um tempo de 60 minutos de exposição ao incêndio-padrão para o **Caso 1**, considerando um perfil W 150x13 sobreposto por laje de concreto. Na Figura 3 estão apresentados os resultados da elevação de temperatura obtidos via modelo numérico e por meio de procedimentos simplificados de cálculo da NBR 14323:1999 e do Eurocode 3 (2005) para os perfis da análise (ver tabela 1).

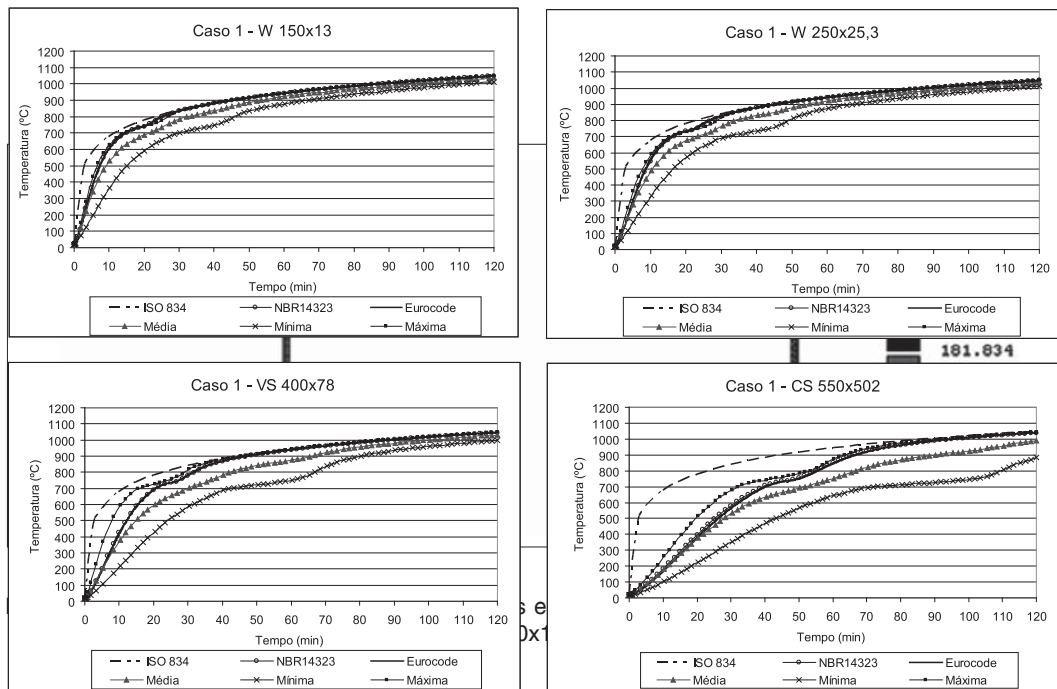


Figura 3 – Curvas da evolução da temperatura versus tempo para o caso 1

De maneira geral, vale dizer que os resultados obtidos, nesse caso, com base nas prescrições normativas da NBR 14323:1999, conduzem a resultados satisfatórios, porém, com temperaturas próximas às temperaturas máximas obtidas numericamente, inclusive para alguns casos em que a espessura das chapas pode ser considerada elevada, se comparada àquelas espessuras de chapas usualmente empregadas na prática das construções correntes.

CASO 7 - Viga I em contato com laje de concreto e alvenaria, exposta ao incêndio pelos dois lados da parede de alvenaria

O *Caso 7* consiste de uma primeira situação de interesse dos casos analisados não contemplado pelos procedimentos normativos (tabela 3). A Figura 4 ilustra a malha de elementos finitos e o campo de temperaturas para um tempo de 60 minutos de exposição ao incêndio-padrão para o caso de estudo 7, considerando o perfil W 150x13.

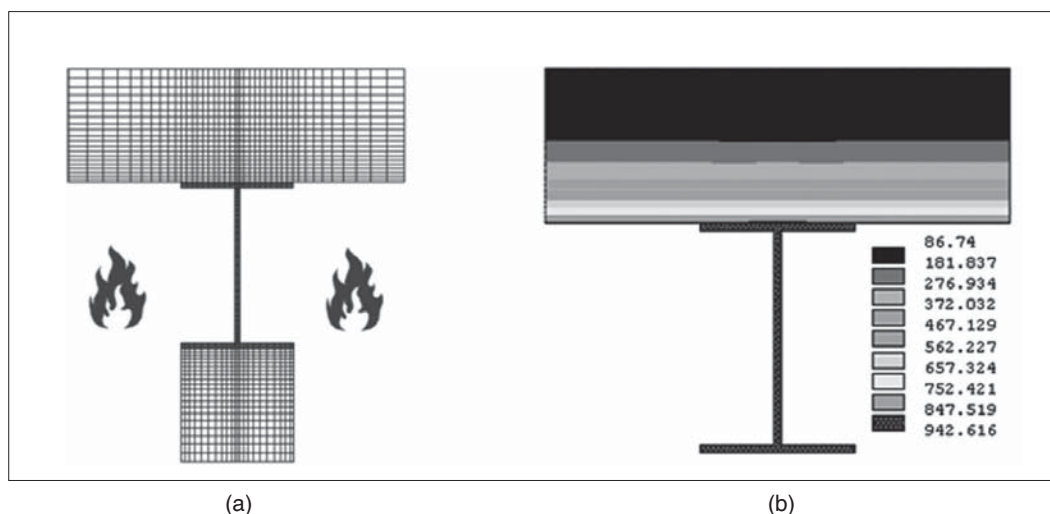


Figura 4: Caso 7: (a) Malha de elementos finitos e (b) Campo de temperaturas correspondente a um tempo de 60 minutos para o perfil W 150x13

Na Figura 5 estão apresentados os resultados da elevação de temperatura obtidos via modelo numérico e por meio do procedimento simplificado de cálculo adaptado da NBR 14323:1999 para os perfis da tabela 1 considerando o caso 7. Com relação ao cálculo do fator de massividade, com vistas ao emprego do procedimento simplificado de cálculo adaptado da NBR 14323:1999, considera-se o perímetro exposto ao fogo do elemento, que não está em contato com alvenaria ou laje, e a área total da seção de aço.

Pela análise da Figura 5, nota-se que a curva de elevação de temperatura obtida com o procedimento simplificado resulta abaixo daquela curva de temperatura máxima obtida numericamente nas etapas iniciais de aquecimento, porém, acima da curva de temperatura média da seção. Para tempos maiores que 30 min, em todos os perfis analisados, as curvas de temperatura obtida com o procedimento simplificado se aproxima da curva de temperatura máxima obtida numericamente.

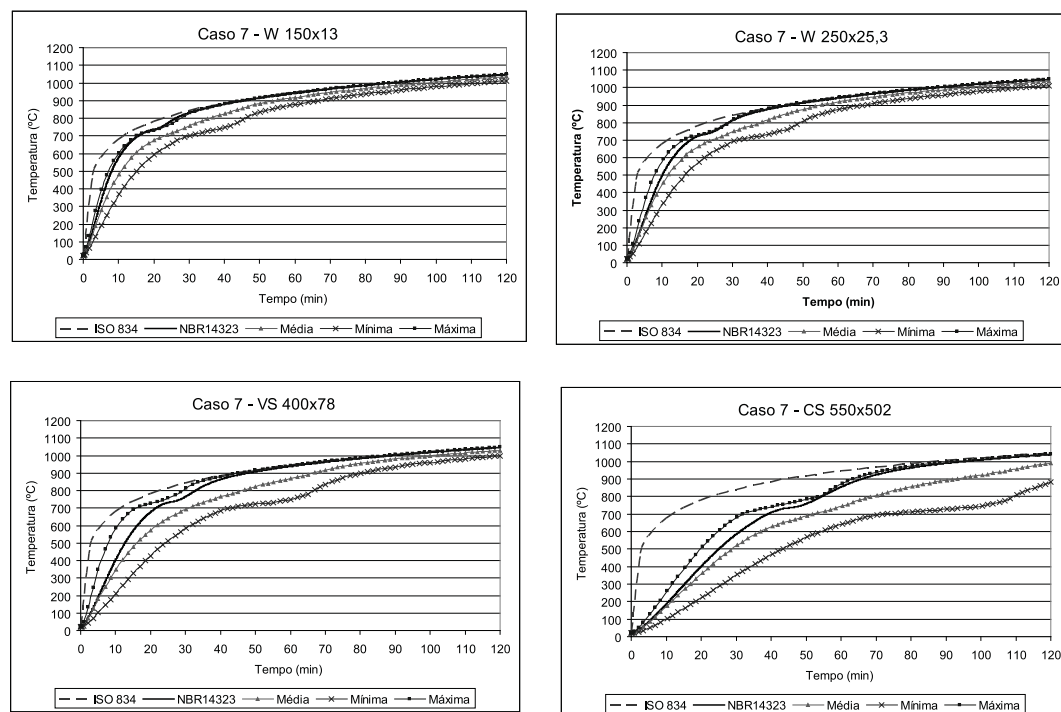


Figura 5: Curvas da evolução da temperatura versus tempo para o caso 7

CASO 9 - Viga I em contato com laje de concreto e alvenaria, exposta ao incêndio em apenas um lado da parede de alvenaria

Este caso é geometricamente idêntico ao caso 7, porém, possui diferença com relação às condições de contorno do modelo. Aqui se considera a alvenaria como um caso efetivo de compartimentação, isto é, incêndio ocorrendo em apenas um lado da parede de alvenaria.

A consideração da troca de calor com o meio nas superfícies não-expostas do modelo é feita por meio da adoção de um coeficiente de transferência de calor por convecção com valor igual a $9 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Com relação ao procedimento simplificado, no cálculo do fator de massividade considera-se o perímetro do perfil que não está em contato com a alvenaria ou com a laje de concreto, no lado da parede exposta ao fogo, e a área total da seção. Os resultados de interesse obtidos para o caso 9 são apresentados nas Figuras 6 e 7.

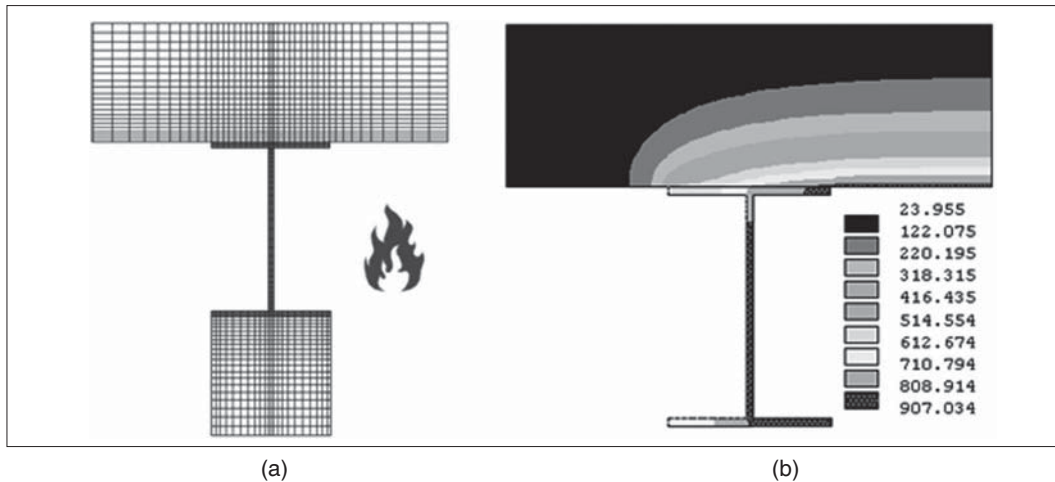


Figura 6: Caso 9 - (a) Malha de elementos finitos e (b) Campo de temperaturas correspondente a um tempo de 60 minutos para o perfil W 150x13

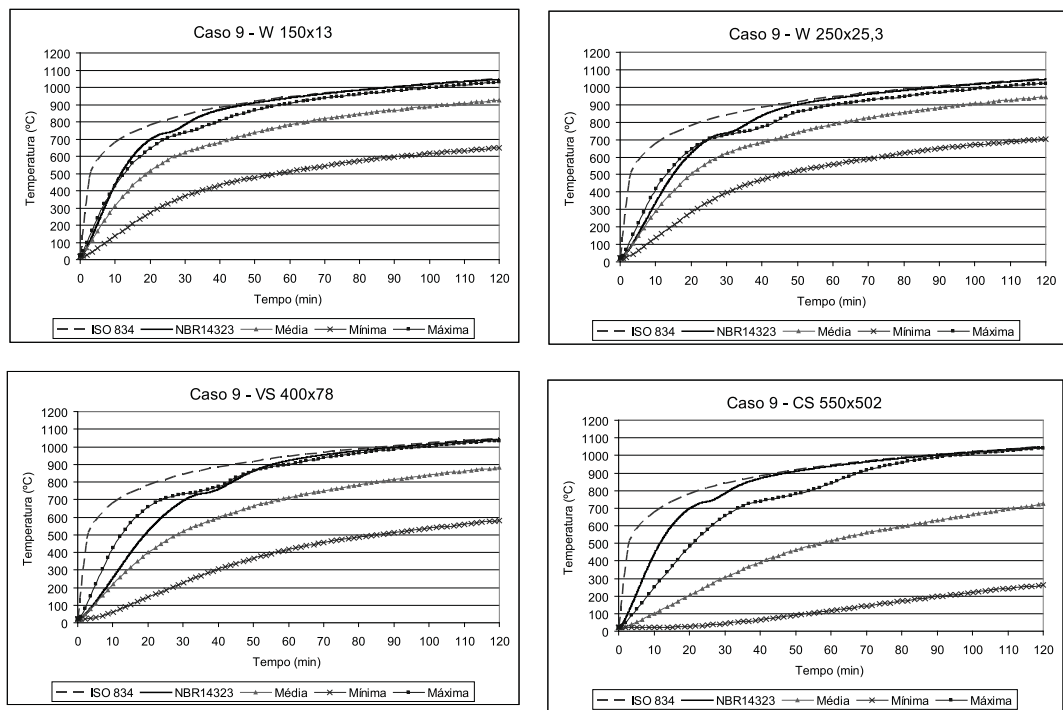


Figura 7: Curvas da evolução da temperatura versus tempo para o caso 9

Com relação aos resultados obtidos para o *caso 9* nota-se que a curva de elevação de temperatura obtida por meio de adaptação do procedimento simplificado da NBR 14323:1999 se aproxima da curva de temperatura máxima obtida numericamente, porém, ora acima ora abaixo desta, para tempos de exposição inferiores a 30 min.

Nota-se também uma grande distância entre as curvas de temperatura máxima e mínima na seção, o que sugere uma limitação para abordagem do problema quando da aplicação da adaptação do procedimento simplificado proposto pela NBR 14323:1999.

CASO 10 - Pilar com mesas em contato com paredes de alvenaria, exposta ao incêndio em apenas um lado da parede de alvenaria

Para essa situação, esquematizada na Figura 8, tal qual no *Caso 9* se considera a alvenaria como um caso efetivo de compartimentação, com o incêndio ocorrendo em apenas um lado da parede de alvenaria. A consideração da troca de calor com o meio nas superfícies não-expostas do modelo é feita por meio da adoção de um coeficiente de transferência de calor por convecção igual a $9 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Com relação ao procedimento simplificado, no cálculo do fator de massividade considera-se o perímetro do perfil que não está em contato com a alvenaria ou com a laje de concreto, no lado da parede exposta ao fogo, e a área total da seção. A Figura 8 ilustra a malha de elementos finitos e o campo de temperaturas para 60 minutos de exposição ao incêndio-padrão para o caso 10.

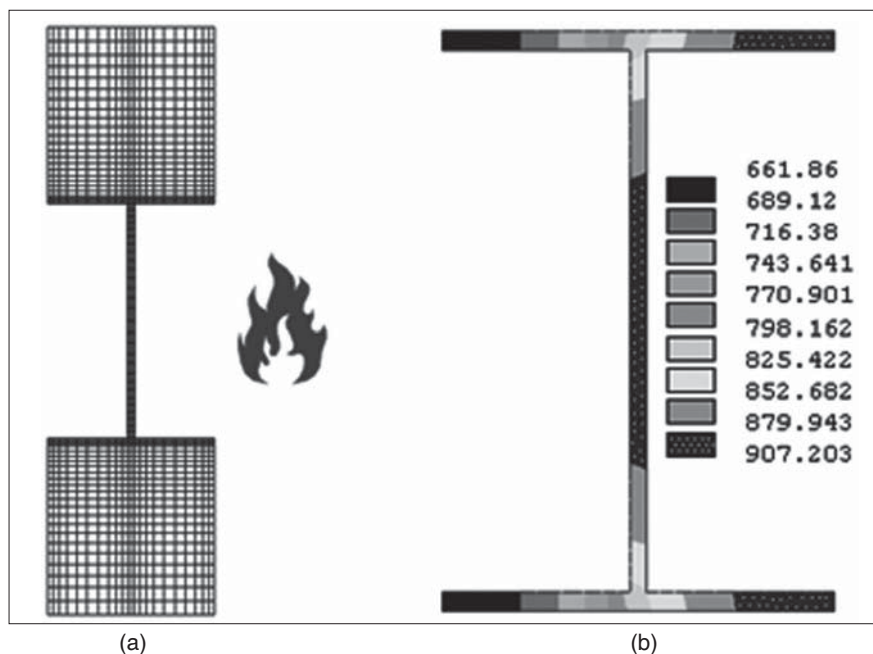


Figura 8: CASO 10 - (a) Malha de elementos finitos e (b) Campo de temperaturas correspondente a um tempo de 60 minutos para o perfil W 150x13

Os resultados da elevação de temperatura para os perfis da tabela 1, considerando-se o caso 10, podem ser vistos na Figura 9. Analogamente ao caso anterior, ao se analisar os resultados da Figura 9 nota-se também uma grande distância entre as curvas de temperatura máxima e mínima na seção, ou seja, uma limitação para aplicação da adaptação do procedimento simplificado proposto pela NBR 14323:1999.

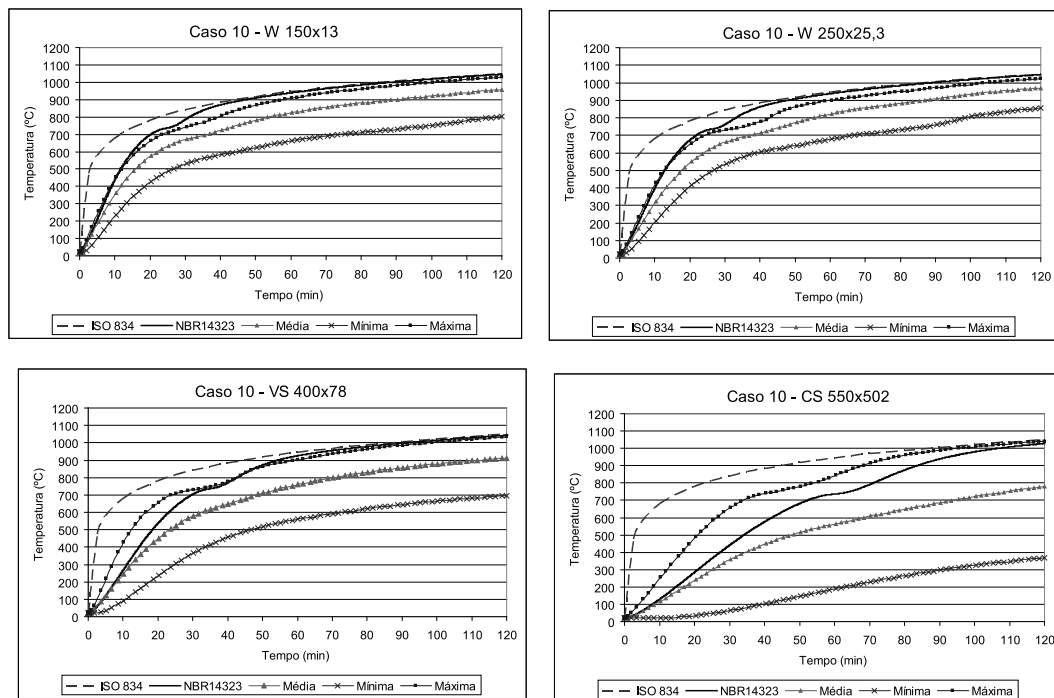


Figura 9 – Curvas da evolução da temperatura versus tempo para o caso 10

5 Conclusões

Considerando as análises para os casos normatizados (tabela 2), no referente à determinação dos níveis de temperatura para as seções transversais dos elementos, é possível admitir que os resultados obtidos com base nas prescrições da NBR 14323:1999 são satisfatórios, porém, com temperaturas próximas às temperaturas máximas obtidas numericamente. Isso ocorre inclusive para alguns casos de chapas com espessura elevada, se comparada às espessuras usualmente empregadas nas construções correntes.

Assim, sugere-se um ajuste dos fatores de massividade, pela aplicação de um coeficiente de redução para tal parâmetro, que seja função da espessura das chapas que constituem o perfil, de modo a encontrarem-se valores de temperaturas menos severos para fins de dimensionamento em situação de incêndio. Esse coeficiente de redução deve ser aferido experimentalmente.

Os resultados obtidos para os casos não-normatizados (tabela 3), referentes às temperaturas nas seções dos elementos obtidas numericamente, e com base nas adaptações das prescrições da NBR 14323:1999 adotadas neste trabalho, evidenciam a necessidade da aplicação de modelos avançados de cálculo para tais situações, ou estudos com vistas à obtenção de procedimentos simplificados mais adequados para esses casos.

As diferenças significativas entre temperaturas máximas e mínimas nas seções transversais para as situações da tabela 3 indicam a presença de gradientes térmicos elevados, que devem ser avaliados cuidadosamente quanto à possibilidade da introdução de efeitos nocivos na análise estrutural. Tal aspecto deve ser objeto de estudo futuro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP e à FAPESP - *Fundação de apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo* pelo apoio concedido a este trabalho.

Referencias

Ansyst Inc. (2004). *Ansyst Release 9.0 - Documentation*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1999). *Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento*. NBR 14323. Rio de Janeiro, Brasil.

European Committee for Standardization (2002). *Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures. Part 1-2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire, final draft*. prEN 1991-1-2. Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization (2005). *Eurocode 3 - Design of Steel Structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design*. EN 1993-1-2. Brussels, Belgium.

European Committee For Standardization (2005). *Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design*. EN 1994-1-2. Brussels, Belgium.

International Standard (1999). *ISO 834-1 - Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*.

Regobello, R. (2007). *Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

Silva, V. P. (2005). *Determination of the steel fire protection material thickness by analytical process - A simple derivation*. Engineering Structures”. ISSN: 0141-0296. v. 27, n. 14, p. 2036-2043. United Kingdom.

Vila Real, P. (2003). *Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural*. Edições Orion, Mafra, Portugal.

Wang, Y. C. (2002). *Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety*. Spon Press, London, United Kingdom.

Numerical analysis of temperature rising in steel and composite steel-concrete cross-sections in fire situation

Abstract

This paper presents a study of the temperature rising in steel and composite steel-concrete structural elements cross sections in fire situation, within the context of numerical analysis using the code ANSYS v9.0. This study was carried out to analyze the temperature rising by normative equations proposed in Brazilian standard NBR 14323:1999, considering the simple calculation model, especially for the cases in which elements are exposed to a non-uniform fire situation. It was verified that the temperature levels obtained in cross section elements using NBR 14323:1999 leads to values of temperatures similar to the maximum temperatures obtained numerically. By the other hand, for the usual cases not contemplated by NBR 14323:1999, it is evident the necessity of employing advanced calculation models or studies for the development of analytical methods for such situations.

Key words: Structures in fire. Steel structures. Composite structures. Thermal analysis. Numerical analysis.

1 Introduction

In the context of structural fire engineering design is well know the fact that normative codes with prescriptive approach, based on the standard fire resistance tests, conduces to anti-economical designs. In this sense, the fire safety regulations in constructions starts to consider the performance of the structural elements in a global behavior of structures when immersed in real fire scenarios, called “performance based” approach. The advances in fire safety design of structures around the world, as well as the exigencies of fireman corporations in big cities, have been stimulated, in Brazil, studies related to “fire safety”, especially structures in fire.

The numerical study presented in this paper was developed with the purpose of evaluating the temperature determination by normative equations proposed in Brazilian standard NBR 14323:1999, considering the simple calculation model model, especially in cases in which the cross section are submitted to a non-uniform fire exposition. The results here presented was obtained from another work, Regobello (2007), where are analyzed others type of cross sections.

2 Cases of study and numerical modeling

In the context of structural design under fire condition it is necessary to obtain the rise of temperature at the structural elements, thought the length and in cross section. The methods that allows obtain the temperature evolution are divided basically in *simple calculation models* and *advanced calculation models*. The *simple calculation models* allow obtaining the homogeneous rise of temperature for the structural elements, by means of simple analytical equations. The *advanced calculation models* are based on numerical methods, such as Finite Difference Method (FDM) or Finite Element Method (FEM), with the goal to obtain the temperature field in the elements during the heating process.

The results of the temperature determination by normative equations proposed in Brazilian standard NBR 14323:1999, were evaluated studying numerical models of eleven steel and composite steel-concrete cross-sections cases commonly applied in the steel construction. The study cases focused 6 normative and 5 non-normative cases, including non-uniform exposition in fire situation. In each case of cross section, the temperature rising is obtained considering 4 profiles type I chosen for covering the range of section factor between 50 e 400 m⁻¹. The ISO 834 (1999) standard time-temperature curve was considered for environment gas temperature rising.

Two types of finite elements were used for numerical simulations: PLANE77 for modeling the steel cross sections and the fire protection material and SURF151 for applying the convective and radiation boundary conditions to the models. The finite element PLANE77 is a 2-D finite element with eight nodes and only one single degree of freedom (temperature) in each node. The finite element SURF151 can be used considering many types of loads and surface effects for 2-D thermal analysis. In the present work, two layers of SURF151 were used at the boundaries of the models, to apply convection effects and radiation effects, respectively.

With the aim of numerical strategy validation, here in were tested firstly some case presented in technical literature, in which were considered SAFIR, PFEM_2D and SUPERTEMPCALC computer codes, and then compared with results obtained with ANSYS.

For the boundary conditions of radiation and convection in the study cases were followed the strategy adopted in Lewis (2000). For each numerical model, the resultant emissivity ϵ_{res} adopted to the steel, concrete, masonry and insulation material was equal to 0,5. Its worthwhile remembers that NBR 14323:1999 prescripts the value 0,5 for the steel resultant emissivity. The convection heat transfer coefficient (α_c) was adopted equal 25 W/m² following NBR 14323:1999 prescription. To the side of safe, the non-exposed surface of concrete was considered adiabatic, except for the cases with exposition by only one side of the steel element. In these cases, the heat changes between the non-exposed surface cross-section and the environment were taken equal a 9 W/m² °C, which is one of the Eurocode 1 (2002) recommendations.

3 Conclusions

The temperature levels obtained for structural elements by prescriptions of NBR 14323:1999 lead to satisfactory results but with temperatures near to the maximum temperatures obtained numerically. That behavior is expected also for some cases where the thickness is greater than that ones usually employed in the constructions. So, as suggestion, a reduction coefficient for the section factor in function of thickness of steel can be established in sense to obtain temperature values less rigorous for design purposes in fire situation. However, for the introduction of such reduction factor for the section factor are necessary more studies and an experimental validation in structural elements or structural systems in fire situation.

For the usual cases not contemplated by the NBR 14323:1999, is evident the necessity of employing advanced calculation models or studies for the development of analytical methods for such situations. The significant difference between the maximum and minimum temperatures in the cross-sections for de cases of table 3 accuses the presence of thermal gradients that must evaluated carefully because of the possibility of the introduction of harmful effect in the structural analysis. Such aspect will be object of future studies.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Department of Structural Engineering of the EESC/USP and the financial support of FAPESP – Sao Paulo State Research Support Foundation – Brazil.