

Avaliação numérica da eficiência dos materiais de proteção térmica para estruturas de aço em situação de incêndio

Natan Sian das Neves^{1*}, Rodrigo Silveira Camargo² e Macksuel Soares de Azevedo³

¹ PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, natan.neves@coppe.ufrj.br

² Professor Doutor do Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, rodrigo_camargo2000@yahoo.com

³ Professor Doutor do Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, macksuel.azevedo@gmail.com

Numerical evaluation of the efficiency of thermal protection materials for steel structures under fire conditions

Resumo

Este artigo concentra-se em avaliar numericamente o desempenho térmico de materiais de revestimento contra fogo para proteção de perfis I de aço. Para tanto, estuda-se três configurações de proteção contra fogo: a seção de aço com revestimento do tipo contorno, utilizando as argamassas Blaze-Shield DC/F, Blaze-Shield II e Monokote MK-5, e a seção de aço envolvida parcialmente e totalmente por concreto. São realizadas aferições preliminares acerca do emprego dos métodos simplificados de cálculo segundo ABNT NBR 14323:2013. Como resultado da investigação, a argamassa Monokote MK-5 desempenha o comportamento mais eficiente no isolamento térmico do perfil de aço em comparação aos outros materiais testados. Os procedimentos normativos apresentam limitações e devem ser aplicados com cautela em projetos e dimensionamento de estruturas.

Palavras-chave: *simulação computacional, incêndio, proteção térmica, estruturas de aço, elementos finitos.*

Abstract

This article focuses on numerically evaluating the thermal performance of the thermal protection materials of steel I profiles. Three fire protection configurations are studied: the steel section with contour encasement of uniform thickness, using the Blaze-Shield DC / F, Blaze-Shield II and Monokote MK-5 mortars, and steel sections partially and fully encased with concrete. Preliminary measurements are carried out on the use of simplified calculation methods according to ABNT NBR 14323: 2013. As a result of the investigation, the Monokote MK-5 mortar performs more efficiently in the thermal insulation of the steel profile compared to the other materials tested. The standardized design guidelines have limitations and must be applied with caution in projects and design of structures.

Keywords: *computational simulation, fire, thermal protection, steel structures, finite elements.*

* autor correspondente

1 Introdução

A utilização das estruturas de aço em países como Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido é amplamente difundida há décadas. No Brasil, segundo Faleiros *et al.* (2012), a indústria de estruturas de aço apresenta um crescimento considerável nos últimos anos. Essas estruturas apresentam visíveis benefícios para projetistas, arquitetos e engenheiros, ao longo da elaboração dos projetos, como a redução do tempo de construção, aumento da produtividade, racionalização de materiais e mão de obra, bem como a liberdade no desenvolvimento de projetos arquitetônicos. Apesar da capacidade dos elementos de aço de suportarem elevadas cargas, esses quando submetidos à ação de elevadas temperaturas, perdem significativamente sua capacidade resistente por causa das severas alterações nas propriedades termomecânicas do material.

Neste contexto, o uso de técnicas e estratégias para a proteção contra fogo de projetos estruturais de aço, visam minimizar os prejuízos contra a vida humana e ao patrimônio. A engenharia de segurança e combate contra incêndio, recomenda medidas de proteção ativa, como a instalação de sistemas de detecção de fumaça, chuveiros, alarmes e extintores, e de proteção passiva, que tem como objetivo apresentar medidas relacionadas à compartimentação vertical e horizontal, as saídas de emergências e ao emprego de materiais de revestimento contra fogo.

Os materiais de proteção contra incêndio desempenham um importante papel para assegurar os critérios de segurança e de capacidade resistente. Segundo Fakury (1999), os materiais pioneiros empregados para proteção dos elementos estruturais foram a alvenaria e o concreto, caracterizados pela grandes espessuras e as dificuldades na construção. Desta forma, mesmo que concreto apresente um desempenho térmico satisfatório para proteção contra incêndio e sendo um material amplamente utilizado no Brasil, ele possui características indesejáveis tais como alto custo, necessidade de formas, dificuldade de trabalhabilidade e elevado tempo de cura, além da possibilidade da ocorrência do fenômeno de lascamento do concreto sob altas temperaturas (em inglês *spalling*), conforme pode ser visto em Liu *et al.* (2018). Portanto, devem-se buscar alternativas, técnicas e materiais eficientes para a garantir os requisitos mínimos de segurança nos projetos de estruturas em condição de incêndio.

Atualmente, associado ao amplo desenvolvimento de novas tecnologias, existem disponíveis no mercado uma extensa quantidade de materiais de revestimento contra fogo com diferentes características e funcionalidades. Segundo Silva *et al.* (2010), esses materiais devem apresentar baixa massa específica, baixa condutividade térmica e alto calor específico, além de garantir sua integridade durante a evolução do incêndio, sem causar aumento excessivo no peso próprio no sistema estrutural, e apresenta uma adequada resitência mecânica e um custo compatível. Os materiais de proteção térmica evitam o aquecimento excessivo do elemento de aço, possibilitando que esse desempenhe as suas funções estruturais adequadamente, sem que ocorra perdas significativas de sua capacidade resistente ao longo da exposição aos elevados gradientes térmicos provocados pelo incêndio.

Na construção civil, usualmente, aplica-se os revestimentos do tipo contorno com argamassas projetadas, do tipo caixão com placas rígidas de gesso ou materiais fibrosos, além do emprego de tintas intumescentes ou combinações entre eles. Desta forma, inúmeras pesquisas científicas, como os trabalhos de Kodur e Shakya (2013), Bilotta *et al.* (2016), Piquer e Hernández-Figueirido (2016), são desenvolvidas com a finalidade de compreender como se comporta fisicamente os materiais sob altas temperaturas e avaliar a eficiência térmica dos tipos de revestimentos utilizados para proteção das estruturas contra fogo. Além disso, atrelado ao surgimento de novas tecnologias e materiais, Zhang e Li (2015, 2016) propõem utilizar compósitos cimentícios como materiais de proteção contra fogo, uma vez que esses apresentam características desejáveis de isolamento térmico, pulverização, leveza e propriedade mecânica aprimorada. Além da utilização de materiais poliméricos inorgânicos e geopolímeros à base de potássio como materiais de proteção, conforme tratados nos trabalhos de Sakkas *et al.* (2014, 2015). Por sua vez, Carabba *et al.* (2019) realizam um estudo preliminar sobre a aplicação das argamassas leves ativadas por álcalis para proteção passiva contra fogo estruturas em condição de incêndio. Paralelamente, por causa dos efeitos das intempéries, fenômenos naturais e desgaste ao longo da vida útil, danos localizados podem surgir nos materiais de revestimento, deixando os elementos estruturais desprotegidos contra fogo. Dwaikat e Kodur (2012), Braxtan e Pessiki (2011) e

Jin e Chun (2020) apresentam análises experimentais/computacionais acerca comportamentos dos elementos sob essas condições.

Neste contexto, existem diferentes linhas de pesquisa relacionadas ao estudo e aplicações dos materiais de proteção contra fogo na engenharia e áreas afins. O Brasil carece de pesquisas científicas experimentais e numéricas sobre o comportamento dos materiais de revestimento contra fogo. Desta maneira, em modo geral, este trabalho realiza um estudo preliminar sobre a eficiência térmica dos materiais de revestimento e dos sistemas de proteção contra incêndio aplicados nos perfis de aço, visando diminuir o aumento excessivo de temperatura nos elementos estruturais sob altas temperaturas.

Para tanto, com base em análises numéricas, investiga-se o comportamento de um perfil I de aço envolvido por diferentes tipos de proteção contra fogo. Analise-se três configurações de proteção térmica para o perfil I de aço exposto ao fogo: revestimento do tipo contorno com espessura uniforme, revestimento envolvendo parcialmente e totalmente o perfil de aço com concreto, conforme exemplificado na Figura 1.

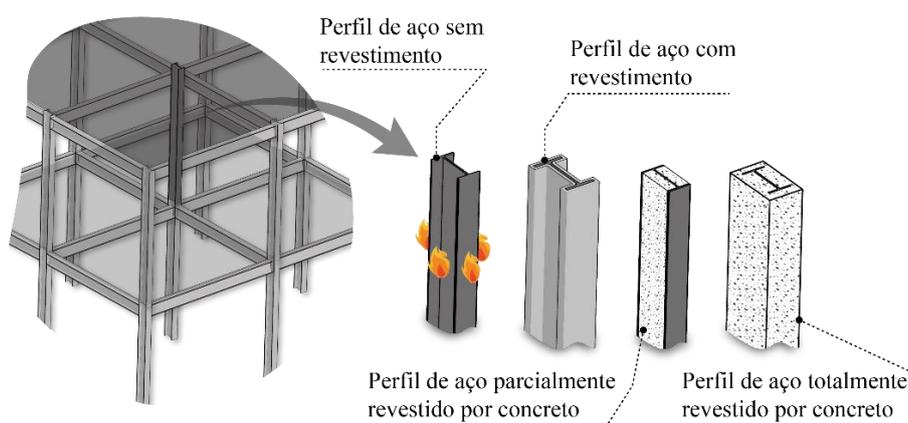


Figura 1 – Tipos de proteção térmica contra incêndio para perfis de aço

O elemento de aço é exposto ao fogo em todas as faces, situação usual em sistemas estruturais com perfis centralizados na edificação. Sendo assim, este trabalho visa especificamente (i) apresentar e aplicar o módulo computacional específico, implementado em ambiente Matlab, para análise térmica bidimensional de estruturas em condição de incêndio, denominado de NASEN/TA-FIRE; (ii) verificar a influência das propriedades físicas dos materiais de proteção térmica no cálculo da temperatura do perfil; (iii) aferir o desempenho térmico entre as argamassas Blaze-Shield DC/F, Blaze-Shield II e Monokote MK-5; (iv) estimar a redução da capacidade resistente do momento fletor dos perfis envolvidos por argamassas; (v) realizar uma comparação entre os

resultados computacionais e os procedimentos simplificados segundo a ABNT NBR 14323:2013 e (vi) comparar a eficiência das configurações de proteção térmica contra incêndio (ver Figura 1).

2 Aspectos físicos-matemáticos e numéricos da análise térmica

2.1 Modelagem matemática térmica de estruturas em condição de incêndio

No processo de modelagem matemática do fenômeno da condução de calor dos elementos estruturais expostos ao incêndio, a partir dos princípios da conservação de energia, define-se a equação de difusão de calor, na forma geral, em coordenadas cartesianas, conforme apresenta a Equação (1) (HAHN; ÖZISIK, 2012).

$$k(\theta)\nabla^2\theta - c(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Onde θ é a temperatura do elemento estrutural, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), ρ é a massa específica, em kg/m^3 , k é a condutividade térmica, em $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, c é o calor específico do material, em $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$. Em situação de incêndio, emprega-se o fluxo de calor combinado de convecção-radiação, na forma linearizada, conforme posto na Equação (2).

$$\dot{q}_n = \alpha(\theta - \theta_g) = [\alpha_c](\theta - \theta_g) + [\varepsilon_{res}\sigma(T + T_g)(T^2 + T_g^2)](\theta - \theta_g) \quad (2)$$

Onde T e T_g são as temperaturas absolutas da estrutura e dos gases quentes, α é o coeficiente de transferência de calor combinado de convecção-radiação. O coeficiente de transferência de calor por convecção, α_c , segue as prescrições da CEN EN 1991-1-2: 2002, sendo igual a $25 \text{ W}/\text{m}^2^{\circ}\text{C}$ para as faces expostas ao fogo. A emissividade resultante, ε_{res} , é considerada igual a 0,7 e a constante de Stephan–Boltzmann, σ , é igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$. A temperatura dos gases quentes ao redor da estrutura, θ_g , em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), pode ser simulada por diferentes modelos matemáticos, como as curvas nominais, paramétricas ou obtidas experimentalmente por meio de ensaios em fornos. Frequentemente, adota-se, simplificada, a curva de incêndio-padrão ISO 834 (ISO, 1999), conforme posto na Equação (3).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (3)$$

Onde t é o tempo, em min, e θ_0 é a temperatura ambiente, usualmente, considerada igual a 20°C . Destaca-se a natureza não linear da equação diferencial de governo do

fenômeno de condução de calor transiente em razão da variação das propriedades físicas dos materiais com aumento da temperatura e a presença dos efeitos térmicos combinados de convecção-radiação.

2.2 Modelo computacional avançado

O programa computacional desenvolvido para análise térmica de estruturas em situação de incêndio tem como base uma programação estruturada e desenvolvida em ambiente Matlab R2015a, denominado de NASEN/TA-FIRE (*Numerical Analysis System for Engineering/Thermal Analysis - Fire*). O módulo computacional permite considerar diferentes parâmetros físicos, variando, por exemplo, as curvas de incêndio, os comportamentos das propriedades físicas dos materiais e as geométricas da seção transversal da estrutura. Além disso, o módulo NASEN/TA-FIRE possibilita considerar diferentes tipos de elementos finitos planos: T3 e T6 – Elemento triangular de 3 e 6 nós, respectivamente, e Q4, Q8 e Q9 – Elemento quadrilateral de 4, 8 e 9 nós, respectivamente, conforme apresentado em detalhes no trabalho de Neves (2019).

O campo de temperatura na seção transversal do elemento de aço em situação de incêndio é computado com base nos procedimentos numéricos de elementos finitos de Galerkin (REDDY, 1993). Sendo assim, o vetor de temperaturas nodais da estrutura (θ), em cada passo de tempo, é obtido pela Equação (4).

$$[\mathbf{C} + \gamma \Delta t \mathbf{K}] \theta_{t+1} = [\mathbf{C} - (1 - \gamma) \Delta t \mathbf{K}] \theta_t + (1 - \gamma) \Delta t \mathbf{F}_t + \gamma \Delta t \mathbf{F}_{t+1} \quad (4)$$

Em que Δt é o passo de tempo e o parâmetro γ é responsável pelo esquema de discretização do tempo, variando de 0 a 1. Neste trabalho, adota-se o esquema de Galerkin ($\gamma=2/3$), caracterizado por ser um método incondicionalmente estável. Além disso, \mathbf{C} é denominada de matriz de capacidade térmica, \mathbf{K} é a matriz de capacitância total e \mathbf{F} é o vetor de ação térmica.

2.3 Propriedades físicas dos materiais

A análise térmica de estruturas em situação de incêndio é um problema de natureza não linear, caracterizado pela variação da massa específica, da condutividade térmica e do calor específico em função da temperatura. Desta forma, as simulações computacionais realizadas no presente trabalho levam em consideração essa característica dos materiais. Para comportamento do concreto sob altas temperaturas, são adotadas as

recomendações do CEN EN 1992-1-2:2004, considerando a densidade em temperatura ambiente igual a 2400 kg/m^3 e um teor de umidade de 1,5% em peso. Para os elementos de aço, a massa específica não varia com a temperatura, assumindo um valor constante e igual a 7850 kg/m^3 , conforme as descrições do CEN EN 1993-1-2:2005.

Em relação aos materiais de revestimento contra fogo, segundo as recomendações do texto da ABNT NBR 14323:2013, deve-se empregar ensaios em laboratórios para determinar as propriedades termofísicas e mecânicas, bem como os comportamentos dos materiais de revestimento contra incêndio. Sendo assim, usa-se, nas análises numéricas, uma classe denominada de materiais resistentes ao fogo aplicados por pulverização (*Sprayed Fire-Resistive Materials - SFRMs*), incluindo as argamassas projetadas Blaze-Shield DC/F, Blaze-Shield II e Monokote MK-5.

Carino *et al.* (2005) apresentam resultados experimentais que descrevem o comportamento das propriedades termofísicas dos SFRMs em função da temperatura, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3. Esses dados experimentais, obtidos no trabalho de Carino *et al.* (2005), são utilizados no modelo numérico e os valores intermediários das propriedades são calculados por interpolação linear. Adicionalmente, Silva (2001) apresenta o comportamento das propriedades da argamassa Blaze-Shield II em função do aumento de temperatura, conforme mostram as Figuras 2 e 3. Nesse modelo, adota-se a massa específica constante e igual a 240 kg/m^3 . Com base nos dados numéricos, obtidos em Silva (2001), Almeida (2019) apresenta expressões matemáticas obtidas por regressão numérica para descrever o comportamento das propriedades físicas do material.

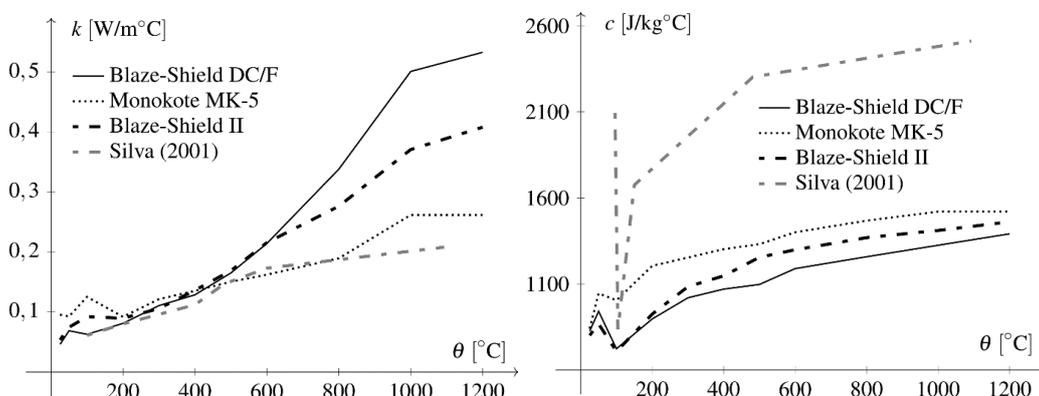


Figura 2 – Condutividade e calor específico dos materiais de revestimento contra fogo

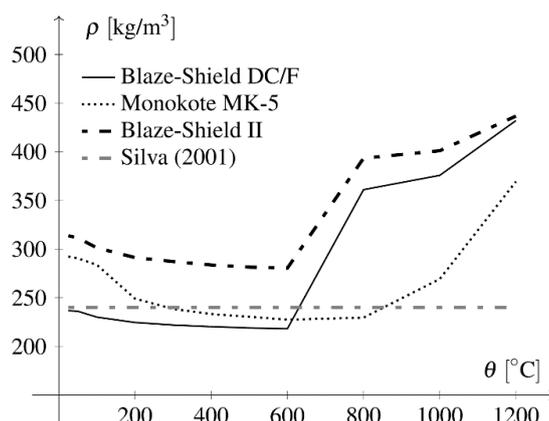


Figura 3 – Massa específica dos materiais de revestimento contra fogo

3 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos com as simulações computacionais realizadas com o programa NASEN, a fim de investigar os comportamentos dos materiais de revestimento contra fogo testados. Para tanto, define-se algumas características e parâmetros gerais dos problemas estudados: (i) o perfil I de aço é do tipo IPE 360 e o pilar de concreto envolvendo totalmente o perfil de aço têm dimensões de 210×400 mm; (ii) a temperatura dos gases do ambiente aquecido é descrita pela curva de incêndio-padrão ISO 834 (ISO, 1999), conforme mostrado na Equação (3); (iii) todos os perfis de aço analisados (com ou sem revestimento) estão expostos ao fogo em todas as faces – um aquecimento simétrico; (iv) as propriedades termofísicas dos materiais utilizados nos modelos numéricos são descritas no item 2.3 do presente trabalho; (v) o passo de tempo (Δt) é igual 10 segundos; (vi) a temperatura ambiente da estrutura é igual a 20°C; (vi) o elemento finito utilizado nas simulações é do tipo triangular linear de 3 nós.

Para a análise térmica de elementos bidimensionais expostos ao fogo, os trabalhos de Neves *et al.* (2020), Neves (2019) e Neves *et al.* (2019) apresentam as validações e comparações adicionais com base em resultados experimentais/numéricos encontrados na literatura para diferentes tipos de estruturas em situação de incêndio, variando os materiais e as configurações físicas recorrentes na engenharia.

3.1 Análise de convergência de malha

A investigação sobre a convergência de malha das simulações computacionais utilizadas para análise do comportamento de estruturas de aço em situação de incêndio é direcionada com base na avaliação dos resultados numéricos para três diferentes níveis de refinamento da malha bidimensional para cada configuração estudada, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Malhas de elementos finitos utilizadas na análise de convergência

Malha	Sem Revestimento			Tipo Contorno			Concreto-Parcialmente			Concreto-Totalmente		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
#nós	24	101	189	142	218	413	126	218	460	129	283	577
#elem	69	169	295	248	382	700	227	389	829	236	518	1072

Para encontrar a malha numérica de referência que será utilizada nas simulações computacionais de cada caso analisado, define-se o valor de temperatura média equivalente no perfil de aço ($\bar{\theta}_{m,eq}$) – que representa um valor abstrato utilizado exclusivamente como um parâmetro de avaliação de convergência dos resultados. Esse valor é calculado pela razão entre a soma das temperaturas médias em cada instante de tempo e o número de incrementos temporais, uma vez utilizado nas simulações um passo de tempo de 10 segundos e 60 min de exposição ao fogo, emprega-se 360 incrementos.

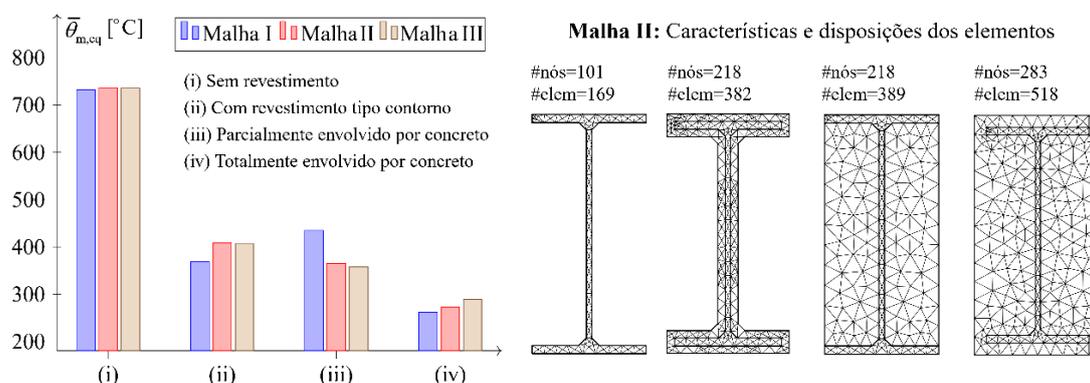


Figura 4 – Análise geral da escolha da malha numérica das simulações computacionais

Desta forma, a partir dos resultados obtidos, apresentados na Figura 4, pode-se notar que em todas as configurações estudadas para proteção contra fogo, a malha II apresenta a melhor relação entre as variações dos resultados e a quantidade de elementos/nós utilizadas nas malhas numéricas – viabilizando o menor custo computacional e precisão nos resultados numéricos. Em outras palavras, existe pouca diferença entre os valores

obtidos com a malha II e a malha III para todos os casos estudados, logo, emprega-se a malha II que apresenta um menor número de elementos finitos.

Na Figura 4, ao lado direito, mostra-se as malhas numéricas de elementos finitos triangulares lineares de 3 nós, utilizadas para as simulações computacionais e análises da presente pesquisa.

3.2 Influência da propriedade física

Nesta seção, realiza-se uma avaliação sobre a influência do comportamento das propriedades físicas do material de revestimento contra fogo no processo de cálculo da evolução de temperatura nos perfis de aço em situação de incêndio. Em outras palavras, esse estudo visa explorar a sensibilidade do modelo térmico em relação a cada tipo de função que descreve as propriedades físicas do material. Essa análise é importante pelo fato que, usualmente, em projetos e dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio, as propriedades dos materiais de revestimento contra fogo não são difundidas facilmente na literatura técnica, os fabricantes fornecem características gerais e de aplicação do produto, encaminhando para o emprego de estratégias simplificadas aos projetos, desconsiderando a variação das propriedades com a temperatura. Desta forma, analisa-se, por meio de simulações computacionais, as seguintes configurações para os perfis de aço:

- (i) SR: Sem revestimento;
- (ii) CRC: Com revestimento/Propriedades dos materiais de revestimento constantes;
- (iii) CRV: Com revestimento/Propriedades dos materiais de revestimento variáveis;
 - (a) /C05: Segundo as funções definidas em Carino *et al.* (2005) – Blaze-Shield DC/F (BS DC/F), Blaze-Shield II (BS II) e Monokote MK-5 (M MK-5);
 - (b) /S01: Segundo as funções definidas em Silva (2001) – Blaze-Shield II.

Para os testes numéricos, utiliza-se somente a argamassa projetada Blaze-Shield II. Em cada configuração analisada, os comportamentos das propriedades físicas do material de revestimento seguem as curvas mostradas nas Figuras 2 a 3, e os valores constantes da argamassa são: condutividade térmica igual a 0,043 W/m°C, calor específico igual a 2093

J/kg°C e a massa específica igual a 240 kg/m³, conforme as características empregadas em Barros (2016).

Para avaliar, quantitativamente, as diferenças entre cada configuração adotada em relação ao comportamento das propriedades físicas do material de revestimento, a Tabela 2 apresenta os valores das diferenças absolutas ($|\Delta|$) entre os níveis de temperatura de cada configuração para 30, 60, 90 e 120 min de exposição ao fogo. Primeiramente, os resultados obtidos para o perfil sem revestimento (SR), indicam um aumento excessivo de temperatura no elemento estrutural de aço, onde se observa que as temperaturas são próximas os valores da curva dos gases ISO 834 (ISO, 1999). Quando se analisa os perfis envolvidos por um material de revestimento contra fogo, em todos os casos, pode ser observado um decaimento nos níveis de temperatura dos perfis de aço.

Tabela 2 – Valores obtidos de temperatura para cada tipo de revestimento do tipo contorno utilizando a argamassa Blaze-Shield II com espessura de 12 mm

t (min)	Gás (°C)	Temperatura média do perfil de aço (°C)					
		SR	⁰ CRC	¹ CRV/C05	$ \Delta_{0-1} $	² CRV/S01	$ \Delta_{0-2} $
30	841,80	821,44	216,47	444,77	228,30	377,91	161,44
60	945,34	942,49	405,14	727,94	322,80	670,36	265,23
90	1005,99	1003,61	543,17	894,15	350,98	784,19	241,02
120	1049,04	1047,42	648,09	1006,69	601,55	929,45	524,31

A partir dos resultados obtidos para cada configuração (SR, CRC, CRV/C05 e CRV/S01), notam-se que existem diferenças consideráveis entre elas, indicando que o adequado conhecimento do comportamento das propriedades termofísicas dos materiais de revestimento contra fogo é um parâmetro importante para a análise térmica e dimensionamento de estruturas em condição de incêndio. Além disso, quando desconsidera-se a variação das propriedades dos materiais de revestimento contra fogo com o aumento de temperatura, o perfil de aço apresenta os menores níveis de temperatura.

3.3 Estimativa da elevação de temperatura nos elementos de aço segundo os procedimentos da NBR 14323

Segundo as prescrições do texto da ABNT NBR 14323:2013, o acréscimo de temperatura no elemento estrutural de aço ($\Delta\theta_{a,t}$), sem ou com material de revestimento contra fogo,

em função do tempo de exposição ao incêndio, pode ser determinado por meio de um expressão analítica simplificada em função de parâmetros físicos, como o perímetro exposto ao fogo, o fator de massividade, o fator de correção e o fluxo de calor.

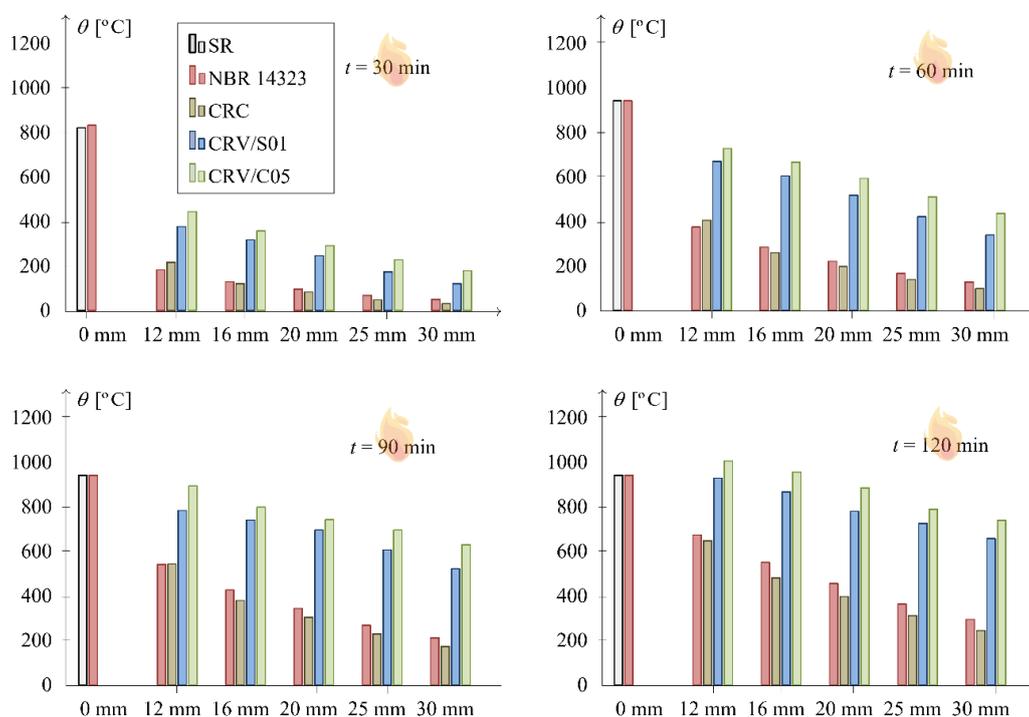


Figura 5 – Comparação dos resultados obtidos com base nos procedimentos normativos e no modelo computacional NASEN

Esses procedimentos simplificados podem ser facilmente empregadas nas análises e verificações de elementos estruturais de aço sob altas temperaturas, utilizando uma rotina iterativa simples de cálculo. Todavia, é importante avaliar as possíveis diferenças nos cálculos geradas com base nos procedimentos normativos e/ou numéricos, a fim de verificar a aplicabilidade e limitações das estratégias utilizadas. Desta forma, realiza-se uma análise comparativa entre os resultados computacionais obtidos com o programa NASEN e com os métodos de cálculo da ABNT NBR 14323:2013. Sendo assim, utiliza-se um perfil I de aço envolvido por uma argamassa projetada Blaze-Shield II, variando a espessura de 12 até 30 mm. No emprego das expressões matemáticas da ABNT NBR 14323:2013, as propriedades físicas do material de revestimento são consideradas constantes e iguais os valores estabelecidos no item 3.2.

Inicialmente, como pode-se notar na Figura 5, as temperaturas dos elementos estruturais de aço, obtidas pelo programa NASEN, para as configurações SR e CRC, são próximas aos valores provenientes dos procedimentos prescritos na ABNT NBR 14323:2013, indicando

uma aderência satisfatória com as expressões normativas. Contudo, quando as propriedades dos materiais de revestimento variam com a temperatura, os resultados apresentam diferenças significativas, mostrando que os procedimentos simplificados na norma brasileira devem ser empregados com cautela nos projetos de estruturas em condição de incêndio, avaliando os parâmetros e hipóteses de cálculo adotadas.

3.4 Avaliação da eficiência térmica dos materiais de revestimento contra fogo

Na Tabela 3, apresenta-se uma comparação entre os valores de temperatura média do perfil I de aço sem e com revestimento contra fogo, adotando os materiais Blaze-Shield DC/F, Blaze-Shield II e Monokote MK-5. Para cada tempo de exposição, as espessuras das argamassas variam de 12 até 30 mm. As propriedades físicas dos materiais de revestimento variam com a temperatura, seguindo o comportamento mostrado nas Figuras 2 a 3.

Tabela 3 – Avaliação quantitativa da eficiência térmica dos materiais de revestimento contra fogo para proteção dos elementos de aço

t (min)	e (mm)	Temperatura média do perfil de aço (°C)						
		⁰ SR	¹ BS DC/F	\Delta_{0-1}	² BS II	\Delta_{0-2}	³ M MK-5	\Delta_{0-3}
30	12		453,26	368,18	444,77	376,67	413,00	408,44
	16		367,71	453,73	358,04	463,40	333,55	487,89
	20	821,44	303,11	518,33	291,77	529,67	272,93	548,51
	25		243,97	577,47	228,53	592,91	213,71	607,73
	30		196,55	624,89	179,26	642,17	168,13	653,31
60	12		745,03	197,45	727,94	214,55	682,85	259,64
	16		690,98	251,51	666,84	275,64	602,42	340,06
	20	942,49	622,28	320,21	594,11	348,37	529,55	412,94
	25		543,32	399,17	511,24	431,25	450,12	492,36
	30		471,61	470,88	437,02	505,47	382,63	559,86
90	12		937,09	66,52	894,15	109,46	807,54	196,07
	16		857,37	146,24	798,50	205,11	740,32	263,29
	20	1003,61	774,04	229,57	743,11	260,50	698,07	305,54
	25		728,30	275,31	695,41	308,20	626,14	377,47
	30		680,86	322,75	630,04	373,57	556,79	446,82
120	12		1024,28	23,14	1006,69	40,74	959,98	87,44
	16		997,53	49,89	957,06	90,37	870,09	177,34
	20	1047,42	949,75	97,67	884,79	162,64	781,98	265,45
	25		868,04	179,39	789,77	257,66	731,38	316,04
	30		785,07	262,35	739,18	308,24	686,28	361,14

Com base nas prescrições do texto da norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 e no código europeu CEN EN 1993-1-2:2005, o aço perde resistência e módulo de elasticidade quando exposto aos elevados gradientes térmicos devido ao incêndio. Neste cenário, emprega-se, simplificada, para fins de comparação dos resultados numéricos obtidos com programa NASEN, uma temperatura de referência para os elementos de aço igual a 550°C. Esse valor simplificado é utilizado somente como parâmetro de comparação devido ao aço apresentar severas reduções na sua resistência e na sua rigidez após exceder essa temperatura de referência estabelecida (SILVA, 2005; SILVA; MELÃO, 2018).

Desta forma, pode-se observar na Tabela 3, até 60 min de exposição ao fogo, que todos os materiais de revestimento contra fogo testados com espessura de 30 mm, apresentam níveis inferiores de temperatura em relação ao valor de referência adotado. Para os tempos seguintes de exposição ao fogo, mesmo que os valores apresentem reduções de temperatura em relação ao perfil sem revestimento, os níveis apresentados excedem ou atingem próximos de 700°C, um valor de temperatura elevado para elementos de aço.

Na comparação da eficiência térmica entre os materiais testados, com base no comportamento proposto por Carino *et al.* (2005), nota-se que a argamassa Monokote MK-5, apresenta as maiores reduções de temperatura em comparação com os valores encontrados com o perfil sem revestimento.

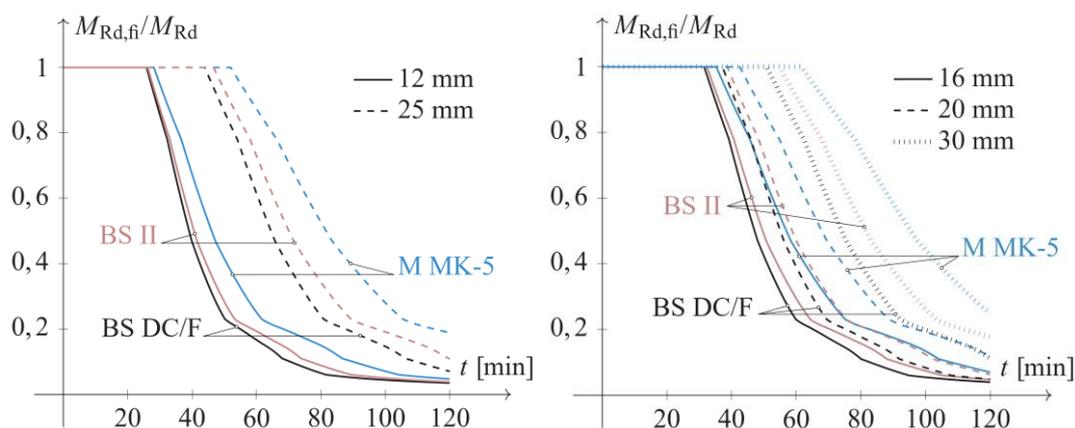


Figura 6 – Redução da resistência do momento fletor ao longo do tempo

Adicionalmente, a Figura 6 apresenta a redução da resistência do momento fletor para um perfil I de aço envolvido por um material de revestimento contra fogo do tipo

contorno sob altas temperaturas - calculada com base na temperatura média no perfil de aço e no coeficiente redutor da resistência do material devido à ação térmica, conforme descrito no texto do nas prescrições do CEN EN 1993-1-2:2005. Realiza-se uma comparação entre cada tipo de argamassa utilizado no estudo, conforme mostrado na Tabela 3, e para cada espessura testada (12 até 30 mm).

Com base nos resultados mostrados na Figura 6, pode-se notar que para cada espessura simulada, a argamassa Blaze-Shield DC/F apresenta as maiores reduções da resistência devido ao aumento excessivo de temperatura no perfil de aço, conforme os resultados obtidos na Tabela 3.

3.5 Comparação entre as configurações de proteção térmica

As análises e discussões apresentadas nos itens anteriores, destinaram-se somente ao comportamento do perfil de aço envolvido por um material de revestimento contra fogo do tipo contorno. Desta maneira, a Figura 7 mostra as comparações entre as configurações de proteção térmica utilizando os revestimentos do tipo contorno e os sistemas parcialmente e totalmente revestidos de concreto (RC) (ver Figura 1).

Conforme mostra a Figura 7(a)-(j), os resultados obtidos, para a temperatura na mesa superior (θ_{ms}) do perfil parcialmente revestido de concreto, apresentam níveis de temperatura elevados por conta do contato direto com fogo. Em contrapartida, para o perfil totalmente revestido, os valores de temperatura mantêm-se menores. Desta forma, é possível verificar a eficiência térmica dos materiais de proteção contra incêndio em comparação ao concreto, como pode ser visto, para uma espessura de 30 mm, as temperaturas na mesa superior do perfil são menores que as medidas no perfil parcialmente RC, e aproximam dos valores medidos no perfil totalmente RC.

Todavia, em relação as temperaturas na alma (θ_a) do perfil de aço, pelo fato da grande espessura de concreto que protege esse elemento, em ambos os sistemas de proteção envolvendo concreto, os valores de temperatura obtidos são inferiores aos resultados atingidos com a utilização das argamassas aplicadas no contorno da seção do perfil de aço. Pelo fato da chapa da alma do perfil de aço apresentar uma menor dimensão em relação as outras, a elevação de temperatura é maior nesse elemento.

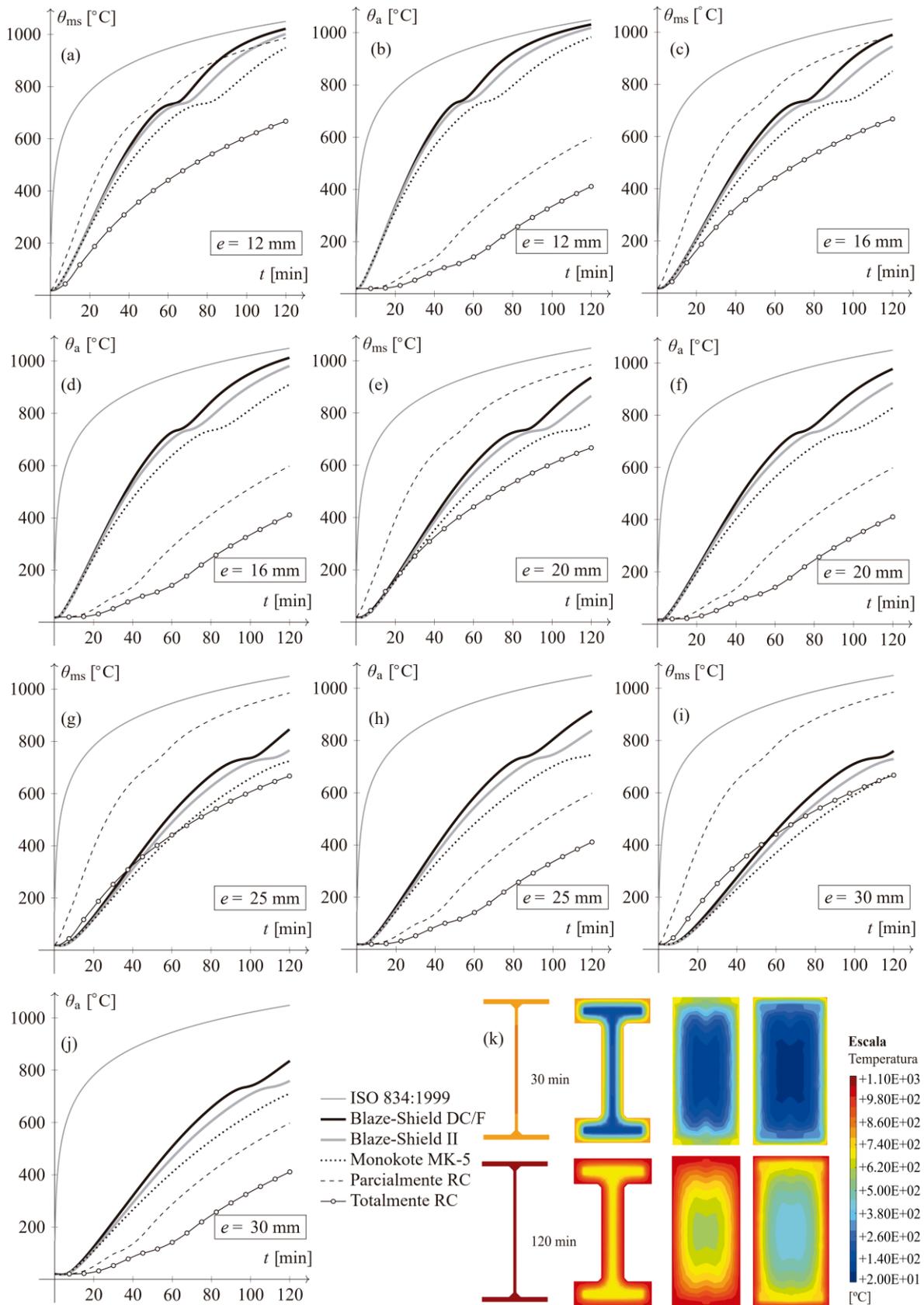


Figura 7 – (a)-(j) Variação da temperatura na mesa superior e na alma do perfil de aço para as configurações de proteção estudadas, e (k) campo térmico para 30 e 120 min

Em modo geral, como apresentado na Tabela 3 e na Figura 7, dentre os materiais de revestimento contra fogo do tipo contorno testados, considerando o comportamento físico descrito em Carino *et al.* (2005), a argamassa Monokote MK-5 apresenta os melhores resultados em relação aos aspectos de isolamento térmico dos elementos estruturais de aço. Adicionalmente, para facilitar o entendimento e a visualização dos resultados da análise térmica de estruturas em condição de incêndio, é comum representar graficamente o campo de temperaturas para um dado instante de tempo, a fim de verificar onde ocorrem os pontos e regiões de maior aquecimento na seção transversal do elemento estrutural. Desta forma, a Figura 7(k) ilustra o campo térmico do perfil de aço sem revestimento e com revestimento do tipo contorno de Monokote MK-5 com espessura de 30 mm, e parcialmente e totalmente revestido de concreto. Como se pode visualizar, as superfícies dos elementos apresentam maiores valores de temperatura por conta do contato direto com fogo. Além disso, é possível observar a funcionalidade do material de revestimento contra fogo, tendo a capacidade de suportar altas temperaturas, garantindo menores níveis de temperatura no interior do perfil.

4 Conclusões

Neste trabalho foi estudado o comportamento de materiais de revestimento contra fogo aplicados na proteção de perfis de aço em condição de incêndio, visando avaliar a eficiência térmica desses materiais, limitações normativas e comparações com sistemas de proteção térmica de perfis envolvendo concreto. Para tanto, as investigações e discussões da pesquisa são fundamentadas em análises puramente numéricas por meio do módulo específico de análise térmica do programa computacional desenvolvido NASEN. Os resultados obtidos permitem apresentar uma avaliação inicial do estudo, indicando, primeiramente, que os modelos computacionais utilizando as propriedades físicas dos materiais de revestimento contra fogo variando com a temperatura, representam uma configuração conservadora para elemento estrutural de aço, uma vez que os níveis de temperatura são maiores quando comparados com as simulações desconsiderando a variação das propriedades físicas. Além disso, seguindo o comportamento físico dos materiais de revestimento descrito em Carino *et al.* (2005), os resultados mostram que a argamassa Monokote MK-5 apresenta as maiores reduções de

temperatura em comparação aos demais materiais de revestimento do tipo contorno testados, além de apresentar as menores reduções da resistência do momento fletor.

As expressões normativas, recomendadas no texto da ABNT NBR 14323:2013, utilizadas para estimar a elevação de temperatura em perfis de aço sem e com revestimento contra fogo, deve ser aplicada com cautela em projetos e dimensionamentos de estruturas de aço sob altas temperaturas, uma vez que esses modelos matemáticos não permitem considerar a variação das propriedades dos materiais de revestimento do tipo contorno com a temperatura, possibilitando considerar somente a variação das propriedades do aço com aumento de temperatura. Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar a existência de significativas diferenças entre os níveis de temperatura obtidos com o programa NASEN e as expressões normativas.

Em relação aos resultados obtidos das comparações com os sistemas de proteção contra fogo utilizando concreto, para uma argamassa de espessura de 30 mm, os níveis de temperatura na mesa superior do perfil de aço são próximos ao sistema totalmente revestido de concreto e inferiores as temperaturas atingidas com o sistema de proteção parcialmente revestido de concreto. Contudo, quando se avalia as temperaturas na alma do perfil, observam-se maiores diferenças nos valores de temperatura em relação aos sistemas revestidos com concreto por conta da grande espessura que protege a chapa da alma do perfil e associado à baixa condutividade térmica do concreto quando exposto a altas temperaturas. Sendo assim, a partir das configurações estudadas no trabalho, recomenda-se aumentar a espessura do revestimento contra fogo para garantir níveis de temperatura aceitáveis de engenharia ou utilizar outros métodos e materiais para realizar a proteção do elemento estrutural de aço.

É importante frisar que a utilização da argamassa projetada apresenta vantagens em frente ao sistema com concreto, uma vez que esse material apresenta alguns benefícios, por exemplo, baixo custo de aquisição do produto, proteção térmica/acústica e utilização versátil em diferentes tipos/formas de elementos de aço. Contudo, os aspectos estéticos não são bem tratados com esse material – uma vez que a estrutura apresenta uma aparência rugosa e desnivelada, além da fragilidade ao contato físico.

Este trabalho testou e investigou somente uma classe particular de materiais de revestimento contra fogo aplicados por jateamento, existem outras opções disponíveis

no mercado que visam atender as características requeridas em projetos de estruturas em condições de incêndio, como capacidade resistente, isolamento, estética, custo e comportamento físico específico. Portanto, os procedimentos adotados nessa pesquisa são puramente numéricos, com base em recomendações e prescrições da literatura, exigindo para uma maior verossimilhança a execução de testes experimentais. Todavia, os resultados obtidos podem ser úteis para nortear ensaios e análises futuras sobre tema.

5 Referências bibliográficas

ALMEIDA, T. M. P. **Análise térmica de pilares de concreto armado expostos ao fogo**. 2018. 100 f. Dissertação. UFAL, Maceió, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

BARROS, R. C. **Avaliação numérica avançada do desempenho de estruturas de aço sob temperaturas elevadas**. Dissertação. UFOP, Minas Gerais, 2016.

BILOTTA, A. *et al.* Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 410-422, 2016.

BRAXTAN, N. L.; PESSIKI, S. P. Postearthquake fire performance of sprayed fire-resistive material on steel moment frames. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 9, p. 946-953, 2011.

CARABBA, Lorenza *et al.* Alkali activated lightweight mortars for passive fire protection: A preliminary study. **Construction and building materials**, v. 195, p. 75-84, 2019.

CARINO, N. J. *et al.* **Passive Fire Protection**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2005, 326 p.

DWAIKAT, M. M. S.; KODUR, V. K. R. A simplified approach for predicting temperature profile in steel members with locally damaged fire protection. **Fire technology**, v. 48, n. 2, p. 493-512, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **EN 1991-1-2**. Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Belgium, 2002

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **EN 1992-1-2**. Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design. Belgium, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **EN 1993-1-2**. Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design. Belgium, 2005.

FAKURY, R. H. Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. In: Seminário Internacional “O uso de estruturas metálicas na construção civil”, 2., Belo Horizonte. 1999. **Anais...** Belo Horizonte: SME. 1 CD- ROM.

FALEIROS, J. P. M. *et al.* O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: um panorama do período 2001-2010. **BNDES Setorial**, n. 35, mar. 2012, p. 47–84, 2012.

HAHN, D. W.; ÖZISIK, M. N. **Heat conduction**. John Wiley & Sons, 2012.

JIN, H.; CHUN, Q. Research on Fire-Resistance Capacities of Steel Columns with Partial-Damaged Fire Protection Coating. **KSCCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 6, p. 1893-1902, 2020.

KODUR, V. K. R.; SHAKYA, A. M. Effect of temperature on thermal properties of spray applied fire resistive materials. **Fire Safety Journal**, v. 61, p. 314-323, 2013.

LIU, J. C. *et al.* A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 581-590, 2018.

NEVES, N. S. *et al.* Estudo térmico de pilares mistos de aço e concreto de seção circular em situação de incêndio. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 9, p. 122-140, 2020.

NEVES, N. S. **Modelo computacional avançado para análise de estruturas sob ação de gradientes térmicos**. Dissertação, UFES, Vitória, 2019.

NEVES, N. S. *et al.* Análise térmica bidimensional de perfil de aço sujeita a elevadas temperaturas. In: X ECFA, 71–73. 2019. **Anais...** Vitória: Blucher Proceedings.

PIQUER, A.; HERNÁNDEZ-FIGUEIRIDO, D. Protected steel columns vs partially encased columns: Fire resistance and economic considerations. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 124, p. 47-56, 2016.

REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method**. McGraw.Hill. New York. 1993.

SAKKAS, K. *et al.* Utilisation of FeNi-slag for the production of inorganic polymeric materials for construction or for passive fire protection. **Waste and Biomass Valorization**, v. 5, n. 3, p. 403-410, 2014.

SAKKAS, Konstantinos *et al.* Behaviour of passive fire protection K-geopolymer under successive severe fire incidents. **Materials**, v. 8, n. 9, p. 6096-6104, 2015.

SILVA, V. P. Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process - a simple derivation. **Engineering Structures**, v. 27, n. 14, p. 2036-2043, 2005.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. Ziguarte Ed. São Paulo. 2001.

SILVA, V. P.; MELÃO, A. R. Temperatura crítica de perfis I de aço em situação de incêndio. *Ambient. constr.*, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 325-342, Apr. 2018.

SILVA, V. P. *et al.* **Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura**. CBCA. Rio de Janeiro, 2010.