

Numerical study of thermal-mechanical behavior of 2D composite steel-concrete frames

Rafael C. Barros¹, Dalilah Pires², Ricardo A.M. Silveira¹, Ígor J.M. Lemes³

¹Dept. of Civil Engineering, Federal University of Ouro Preto
Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto/MG, Brazil
rafael.barros@ufop.edu.br, ricardo@em.ufop.br

²DTECH, Federal University of São João del-Rei
Rod. MG 443, km 7, 36420-000, Ouro Branco/MG, Brazil
dalilah@ufsj.edu.br

³Dept. of Civil Engineering, Federal University of Lavras
Campus Universitário, 37200-900, Lavras/MG, Brazil
igor.lemes@deg.ufla.br

Abstract. The purpose of this study is to apply the advanced numerical methodology developed and implemented in the CS-ASA/FA (Computational System for Advanced Structural Analysis/Fire Analysis) and CS-ASA/FSA (Fire Structural Analysis) to understand the thermal-mechanical behavior of 2D composite steel-concrete frames in fire situation. The analysis is carried out on two-level approaches, the first referring to the structural element cross-section. In this step, the temperature field is calculated using a transient heat transfer model, from where the degradation of stiffness and strength parameters are obtained when the materials are exposed to fire. The second-level stage is related to inelastic second order analysis (ISOA) of the composite steel-concrete structural system under high temperatures. In the ISOA context via finite element method (FEM), a co-rotational formulation is used to follow the large displacements and rotations of the structural model, and the material elasto-plastic behavior is simulated through the Refined Plastic Hinge Method (RPHM) and Strain Compatibility Method (SCM) coupling. Finally, the structural modeling studied seeks to validate the proposed numerical strategy using the results found in literature.

Keywords: composite frames, fire situation, thermal-structural analysis, CS-ASA, RPHM/MCD coupling.

1 Introdução

O emprego de estruturas mistas de aço-concreto é crescente devido às muitas vantagens que essa combinação de materiais proporciona. Este sistema construtivo permite que os dois materiais sejam utilizados em conjunto em vigas, pilares, pórticos, arcos e lajes, de forma a se obter uma estrutura com elevado desempenho estrutural, precisão geométrica e baixo desperdício no local da construção da obra. Embora o concreto e o aço sejam materiais muito diferentes, eles podem se complementar. A combinação ideal de resistência, com concreto eficiente na compressão e aço na tração, pode melhorar significativamente os membros estruturais, fornecendo resistência e redução nas dimensões das seções transversais [1].

Apesar do aumento significativo da utilização das estruturas mistas, em termos de estudos científicos, no Brasil, ainda são modestas as pesquisas sobre o comportamento dessas estruturas, principalmente em situação de incêndio. Dessa forma, o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de simular o comportamento de estruturas sob elevadas temperaturas torna-se extremamente relevante. Diversos trabalhos sobre a investigação numérica e experimental de estruturas mistas em situação de incêndio podem ser citados, como: Han *et al.* [2], Piloto *et al.* [3], Dong *et al.* [4], Ahn e Lee [5], Bahr [6] e Yang e Fu [7].

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é aplicar e verificar a eficiência dos módulos computacionais adaptados, CS-ASA/FA e CS-ASA/FSA, no estudo de pórticos planos mistos de aço-concreto em situação de

incêndio. O primeiro módulo fornece a distribuição de temperatura para seções transversais quaisquer; o segundo módulo foi desenvolvido para desempenhar uma análise inelástica de segunda ordem (AISO) de estruturas submetidas a altas temperaturas. Uma abordagem baseada no Método de Compatibilidade de Deformações (MCD) é proposta para avaliar o nível de resistência da seção transversal e as rigidezes generalizadas, axial e à flexão. A construção da relação momento-curvatura é essencial para essa avaliação. Essa metodologia é acoplada ao Método da Rótula Plástica Refinado (MRPR), no qual a plasticidade é avaliada apenas nos pontos nodais do elemento a partir desses parâmetros de rigidez generalizada [8].

2 Análise térmica

Neste trabalho, a temperatura ao longo de cada elemento estrutural é considerada uniforme e igual ao campo de temperaturas estimado para sua seção transversal. Desse modo, a análise térmica é realizada exclusivamente neste plano através de modelos numéricos de transferência de calor, desenvolvidos com base no método dos elementos finitos (MEF). Para o problema transiente, uma estratégia de integração no tempo baseada no método das diferenças finitas (MDF) é adotada. Esses procedimentos numéricos foram implementados e deram origem ao módulo computacional CS-ASA/FA (Fire Analysis), que possui diversas estratégias numéricas para obtenção do equilíbrio térmico da seção transversal. Dada sua eficiência, apenas a metodologia denominada incremental simples é empregada neste trabalho. Maiores detalhes do referido módulo computacional podem ser vistos em Barros *et al.* [9] e Pires *et al.* [10].

3 Análise termoestrutural

3.1 Formulação do elemento finito via MRPR

O objetivo do MRPR é capturar a evolução da plastificação nos pontos nodais do elemento finito, a partir do início do processo de escoamento da seção até sua plastificação total, caracterizando a formação de uma rótula plástica. O elemento finito adotado é delimitado pelos pontos nodais i e j , como ilustrado na Figura 1, em que P , M_i , M_j são as forças internas associadas aos deslocamentos δ , θ_i e θ_j , respectivamente, no sistema corrotacional.

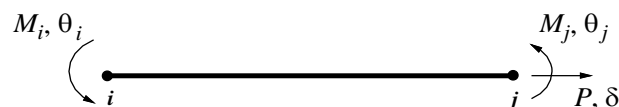


Figura 1. Elemento de viga-coluna referenciado ao sistema corrotacional

A relação de equilíbrio na forma incremental do elemento finito de viga-coluna é dada por:

$$\begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta M_i \\ \Delta M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} \\ 0 & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

com o símbolo Δ denotando os incrementos de cada quantidade. Os termos relacionados a rigidez à flexão na matriz são obtidos seguindo a formulação geométrica simplificada proposta por Yang e Kuo [11].

3.2 Método da compatibilidade de deformações (MCD)

Trata-se de uma estratégia numérica destinada à avaliação da deformação de seções transversais compactas [12]. Isto é, uma vez conhecido os esforços atuantes, é possível se chegar na configuração deformada da seção que seja compatível com esses esforços. O MCD é usado neste trabalho para avaliação das rigidezes generalizadas, axial e à flexão.

No procedimento aqui adotado, supõe-se que todos os materiais que constituem a seção transversal do elemento estrutural atuem de forma conjunta, logo, o campo de deformações é contínuo. Além disso, a seção mista permanece plana após a deformação, conforme ilustrado na Figura 2.

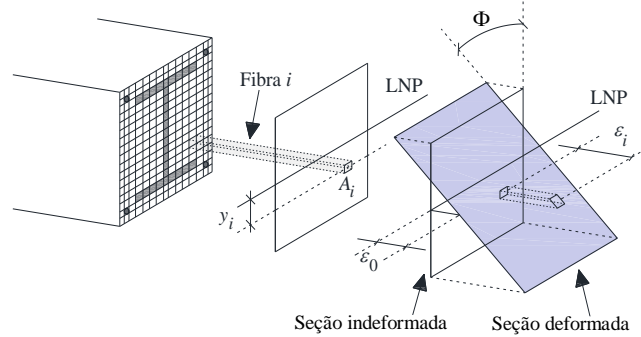


Figura 2. Campo linear de deformações em uma seção transversal mista de aço e concreto

Esse método procura acoplar a configuração deformada da seção à relação constitutiva do material que a compõe. Assim, para que a avaliação da deformação seja precisa em todos os pontos da seção, utiliza-se aqui uma discretização em fibras, como exibido na figura anterior.

3.3 Relação momento-curvatura

Uma distribuição de deformações numa seção mista, para uma dada combinação de esforço axial N e momento fletor M é ilustrada na Figura 2. Assim, a deformação axial na i -ésima fibra é dada por:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + \Phi y_i + \varepsilon_{ri} \quad (2)$$

na qual y_i é a distância entre os centroides plásticos (CP) da fibra analisada e da seção transversal; ε_0 é a deformação axial no CP da seção; ε_{ri} é a deformação devido às tensões residuais (quando considerado); e Φ a respectiva curvatura.

O método iterativo de Newton-Raphson é empregado numa aplicação localizada a nível da seção transversal, buscando a obtenção da relação momento-curvatura ($M-\Phi$). Numericamente, pode-se dizer que o equilíbrio da seção é obtido quando a seguinte equação, escrita na forma matricial, é satisfeita:

$$\mathbf{F} \mathbf{X} = \mathbf{f}_{ext} - \mathbf{f}_{int} = \begin{bmatrix} N_{ext} \\ M_{ext} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_{int} \\ M_{int} \end{bmatrix} < tol. \quad (3)$$

em que o vetor de forças externas \mathbf{f}_{ext} é dado pelo esforço axial, N_{ext} , e de momento fletor, M_{ext} ; e os termos N_{int} e M_{int} são as componentes do vetor de forças internas, \mathbf{f}_{int} . Esse último vetor é dado por expressões integrais clássicas, isto é:

$$\mathbf{f}_{int} = \begin{bmatrix} N_{int} = \int_A \sigma[\varepsilon, \varepsilon_0, \Phi] dA \\ M_{int} = \int_A \sigma[\varepsilon, \varepsilon_0, \Phi] y dA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{int} = \sum_{i=1}^{n_{fib}} \sigma[\varepsilon_i, \varepsilon_0, \Phi] A_i \\ M_{int} = \sum_{i=1}^{n_{fib}} \sigma[\varepsilon_i, \varepsilon_0, \Phi] y_i A_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

sendo n_{fib} o número de fibras geradas pela discretização da seção e tol a tolerância, que foi tomada igual a 10^{-5} nesta pesquisa. Durante o processo iterativo, $k+1$, o vetor de deformações é calculado pela expressão [13]:

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k + \mathbf{F}^{-1} \mathbf{X}^k - \mathbf{F} \mathbf{X}^k \quad (5)$$

em que \mathbf{F}' é a matriz jacobiana para o problema não linear, i.e.:

$$\mathbf{F}' = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} \right) = \begin{bmatrix} f_{11} = \frac{\partial N_{int}}{\partial \varepsilon_0} & f_{12} = \frac{\partial N_{int}}{\partial \Phi} \\ f_{21} = \frac{\partial M_{int}}{\partial \varepsilon_0} & f_{22} = \frac{\partial M_{int}}{\partial \Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_{fib}} E_{T,i} A_i & \sum_{i=1}^{n_{fib}} E_{T,i} y_i A_i \\ \sum_{i=1}^{n_{fib}} E_{T,i} y_i A_i & \sum_{i=1}^{n_{fib}} E_{T,i} y_i^2 A_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

com $E_{T,i}$ sendo o módulo de elasticidade tangente, retirado diretamente da relação constitutiva do material, aço e concreto, para i -ésima fibra. Considerando o critério de convergência [9, 10], os parâmetros de rigidez generalizada são calculados utilizando as deformações nas fibras em relação à configuração deformada e quando a condição de equilíbrio é alcançada. Assim, os termos EA_i e EI_i são descritos da seguinte forma:

$$EA_i = \frac{f_{11}f_{22} - f_{12}^2}{f_{22}} \quad (7)$$

$$EI_i = \frac{f_{11}f_{22} - f_{12}^2}{f_{11}} \quad (8)$$

com os termos da matriz f_{11} , f_{12} , f_{21} e f_{22} definidos na Eq. 6.

Este mesmo procedimento numérico é adaptado e utilizado para a obtenção das curvas de interação NM , e maiores detalhes são exibidos em Barros *et al.* [9] e Pires *et al.* [10]. Adicionalmente, é importante destacar que as relações constitutivas dos materiais, aço e concreto, são adotadas conforme as recomendações normativas [14-16].

Neste trabalho, para estruturas mistas submetidas a altas temperaturas, a deformação total é substituída por uma deformação mecânica, a qual é determinada para uma dada fibra subtraindo a deformação térmica, aqui calculada por meio das expressões propostas pelas normas já especificadas [14-16], da deformação total, Eq. (2). Portanto, na avaliação das forças internas através das equações de equilíbrio e compatibilidade no nível da seção transversal, as tensões são calculadas a partir dessas deformações mecânicas.

4 Exemplo numérico

4.1 Ensaios de Kordosky *et al.* (2020)

Ensaios experimentais de dois portais planos simples em situação de incêndio, construídos a partir de uma viga mista de aço-concreto conectada a duas colunas metálicas, foram conduzidos por Kordosky *et al.* [17], enquanto que em Drury *et al.* [18] estão os resultados das modelagens numéricas dessas mesmas estruturas obtidas através do SAFIR [19]. Os dois trabalhos aqui citados decorreram de forma conjunta, objetivando avaliar o real comportamento das estruturas sob elevadas temperaturas e validar os modelos propostos. Os dois pórticos em questão possuíam as mesmas características geométricas e de carregamento, porém em um dos espécimes, a viga em aço foi recoberta por uma camada de material de proteção contra a ação do fogo com 22,2 mm de espessura, denominado CAFCO 300; no outro pórtico, a viga ficou diretamente exposta às chamas durante todo o ensaio. Os pórticos receberam uma carga constante de 158 kN, dividida em dois pontos de atuação, correspondendo a um momento fletor de aproximadamente 35% em relação ao momento resistente da seção transversal da viga mista. Quanto à carga térmica, as colunas metálicas foram protegidas do fogo por meio de material cerâmico e cada espécime foi sujeita a uma taxa de aquecimento segundo a curva de incêndio padrão da ASTM E-119 [20]. A Figura 3 fornece detalhes sobre a geometria do sistema estrutural e seções transversais, bem como as condições de bordo e carregamento.

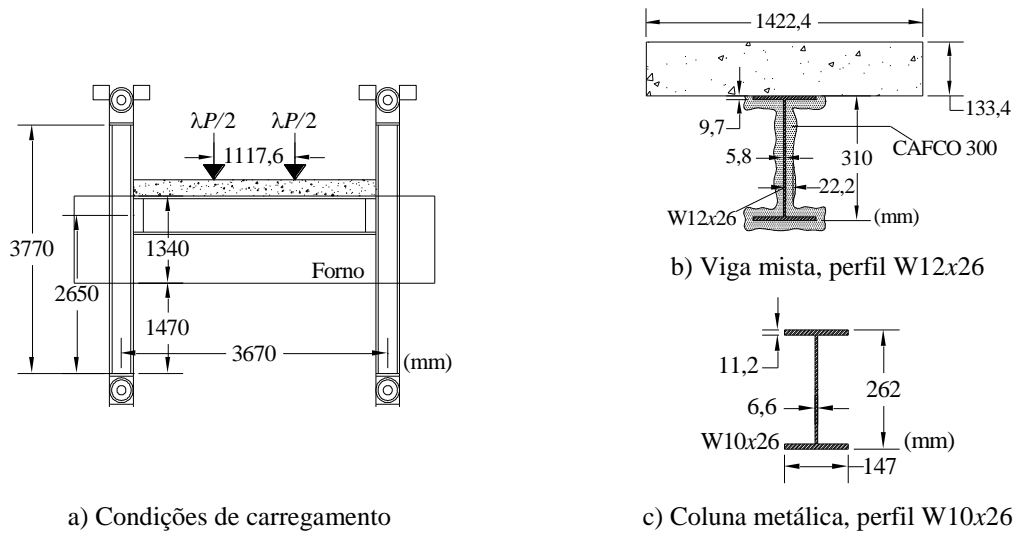


Figura 3. Características gerais do sistema estrutural (dimensões em mm)

Procurando determinar o campo de temperaturas para a seção transversal da viga mista, todas as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais, aço e concreto, foram admitidas em conformidade com aquelas apresentadas no Eurocode 4, parte 1-2 [16]. As propriedades térmicas do elemento de proteção contra o fogo, CAFCO 300, de massa específica igual a 240 kg/m^3 , podem ser vistas em Kordosky *et al.* [17]. A Figura 4 mostra o histórico de temperaturas, considerando as duas condições de exposição, ou seja, seção com e sem proteção térmica, registradas por Kordosky *et al.* [17] em três pontos distintos ao longo da seção transversal, sendo eles: alma, mesa superior e inferior, as quais encontram-se em concordância com as curvas computadas através do CS-ASA/FA.

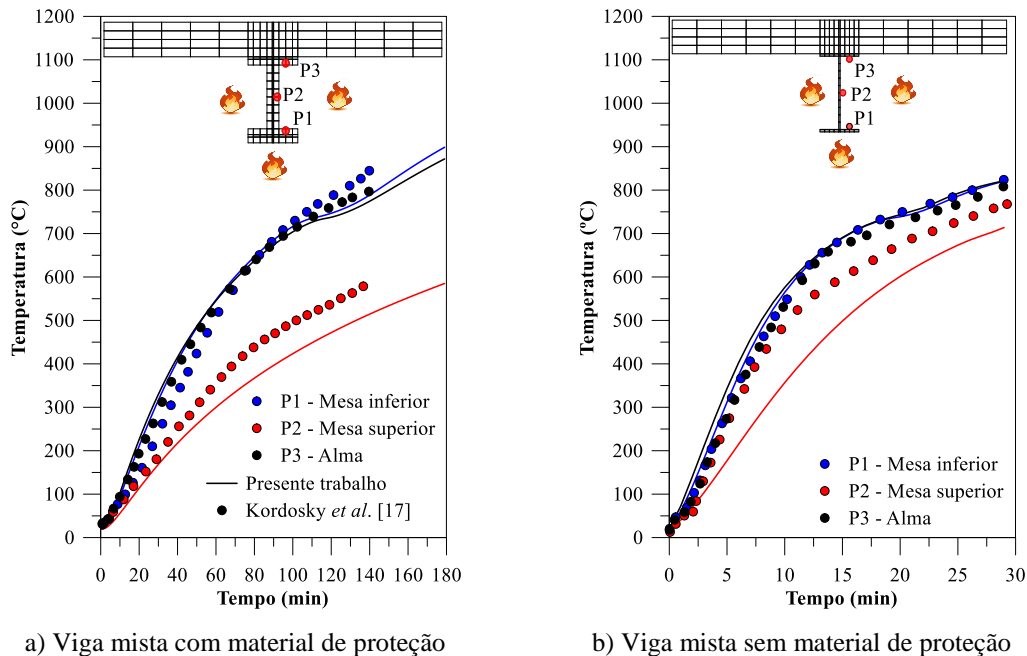


Figura 4. Pórticos mistos de Kordosky *et al.* [17], análise térmica

Faz-se necessário destacar a significativa influência do material de proteção sobre o aumento de temperatura no decorrer do tempo. Para exemplificar, observando a curva referente a mesa inferior, a temperatura de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ foi atingida com aproximadamente 100 min de exposição quando o material CAFCO 300 é aplicado ao perfil

metálico, enquanto que na segunda condição, essa temperatura foi alcançada próximo aos 15 min de ensaio. Ainda sobre a Figura 4, analisando agora as temperaturas computadas na mesa superior, acredita-se que a divergência entre os resultados pode estar relacionada a região de transição entre os materiais, aço e concreto.

Para a solução do problema mecânico sob os efeitos da elevação de temperatura, foram utilizados um total de 26 elementos finitos lineares de viga-coluna (8 elementos por coluna e 10 para a viga), ao mesmo tempo em que as seções transversais da viga mista, com e sem proteção contra o fogo, e colunas, foram subdivididas em 145, 112 e 20 elementos finitos quadriláteros lineares (Q4), respectivamente. O aço foi modelado com uma tensão de escoamento de 345 MPa, e o concreto, a base de agregado silicoso, com uma tensão de compressão máxima tomada como igual a 27,5 MPa. Os resultados da análise termomecânica dos pórticos de Kordosky *et al.* [17] são exibidos na Figura 5. Nesta figura está a evolução dos deslocamentos verticais capturados no meio do vão da viga em função do tempo, medida durante os ensaios [17], os dados computados numericamente e reportados em Drury *et al.* [18], bem como os determinados neste trabalho através do CS-ASA/FSA.

Drury *et al.* [18] destacaram que, a discrepância inicial na deflexão no meio da viga, obtida numérica e experimentalmente à temperatura ambiente, está provavelmente condicionada ao real comportamento das ligações entre viga-coluna e que não é considerado no modelo numérico, em que as ligações são tratadas como rígidas.

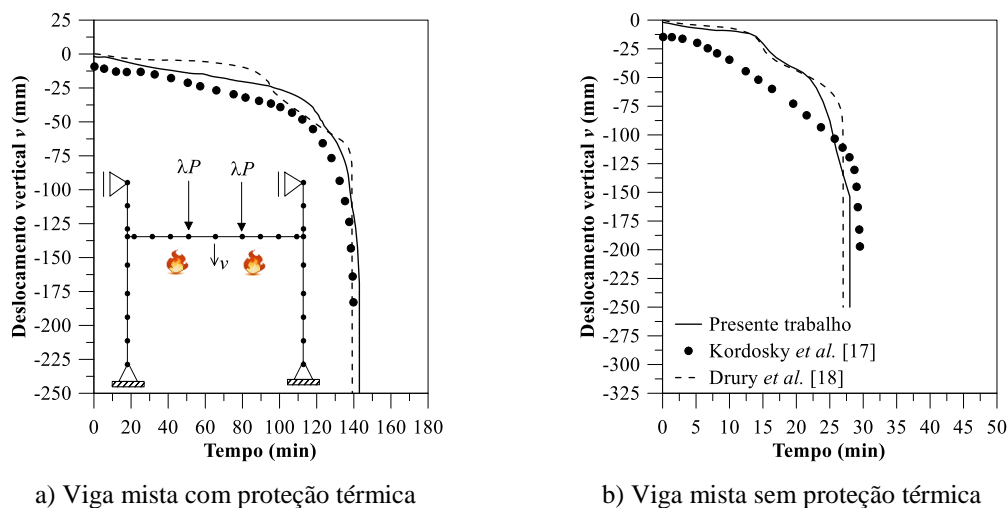


Figura 5. Pórticos mistos de Kordosky *et al.* [17], análise termomecânica

5 Considerações finais

Esta pesquisa destinou-se a utilização, com adaptações, dos módulos computacionais CS-ASA/FA e CS-ASA/FSA para realizar uma análise estrutural avançada de sistemas mistos de aço-concreto em condição de incêndio. A eficiência dos módulos já havia sido testada com pórticos de aço e de concreto armado sob temperaturas elevadas, onde boa concordância em relação à literatura foram observados em ambos os casos [9, 10]. Este trabalho expande então a análise de incêndio para estruturas mistas.

No exemplo apresentado é realizada a validação da metodologia numérica adotada, onde os resultados encontrados a partir dos módulos computacionais mencionados foram comparados aos dados experimentais disponíveis na literatura. De maneira geral, uma boa concordância entre eles é constatada, especialmente em comparação aos dados calculados a partir do SAFIR [19]. Assim como destacado ainda na análise térmica, comparando as Figuras 5a e 5b, é fácil perceber a expressiva influência do material de proteção contra a ação do fogo no comportamento mecânico das estruturas, o que garantiu um elevado ganho de resistência em situação de incêndio. Para o modelo onde há proteção térmica do perfil metálico, o colapso ocorreu acerca de 140 min de exposição às chamas, no entanto, a falha estrutural para o modelo sem proteção foi identificada próxima aos 30 min, o que significa uma diferença no tempo crítico de colapso por volta de 2 h.

Como conclusão final, pode-se afirmar que as implementações computacionais realizadas para adaptar e alterar os módulos CS-ASA/FA e CS-ASA/FSA para a análise de pórticos planos mistos de aço-concreto em condições de incêndio foram realizadas com sucesso e produziram resultados satisfatórios, descrevendo com

bastante realismo o comportamento das estruturas em altas temperaturas e do campo de temperatura no nível da seção transversal.

Por fim, vale salientar que foi apresentado apenas um estudo de validação a partir da análise de pórticos mistos de aço-concreto em situação de incêndio, entretanto, outros trabalhos avaliando o comportamento de membros estruturais isolados sob temperatura elevada, através da metodologia numérica apresentada nesta pesquisa, já foram realizados em trabalhos anteriores dos autores [21, 22].

Agradecimentos. Os autores agradecem a CAPES e CNPq (Agências Federais de Pesquisa), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), PROPEC/UFOP, PROPP/UFOP, UFSJ e a UFLA pelo suporte para a realização desta pesquisa.

Authorship statement. The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

Referências

- [1] A. Landesmann, “Inelastic analysis of semi-rigid composite structures under fire conditions”. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, vol. 33, pp. 483–491, 2011.
- [2] L. H. Han, W. H. Wang, H. X. Yu. “Analytical behavior of RC beam to CFST column frames subjected to fire”. *Engineering Structures*, vol. 36, pp. 394-410, 2012.
- [3] P. A. G. Piloto, A. B. R. Gavilán, M. Zipponi, A. Marini, L.M.R. Mesquita, G. Plizzari. “Experimental investigation of the fire resistance of partially encased beams”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 80, pp. 121-137, 2012.
- [4] Y. L. Dong, X. Q. Peng, Y. Y. Fang, D. S. Zhang. “Behavior of Sway Two-Bay, Two-Story Composite Steel Frames in Fire”. *J. Struct. Eng.*, vol. 142, pp. 1-14, 2016.
- [5] J. K. Ahn, C. H. Lee. “Fire behavior and resistance of partially encased and slim-floor composite beams”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 129, pp. 276-285, 2016.
- [6] O. Bahr. “On the fire performance of unbraced composite frames”. *J. Struct. F. Eng.*, vol. 9, pp. 300-318, 2018.
- [7] Y. F. Yang, F. Fu. “Fire resistance of steel beam to square CFST column composite joints using RC slabs: Experiments and numerical studies”. *Fire Safety Journal*, vol. 104, pp. 90-108, 2019.
- [8] I. J. M. Lemes. *Advanced numerical study of steel, concrete and steel-concrete composite structures*. PhD thesis, Federal University of Ouro Preto, 2018.
- [9] R. C. Barros, D. Pires, R. A. M. Silveira, I. J. M. Lemes, P. A. S. Rocha. “Advanced inelastic analysis of steel structures at elevated temperatures by SCM/RPHM coupling”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 145, pp. 368-385, 2018.
- [10] D. Pires, R. C. Barros, R. A. M. Silveira, I. J. M. Lemes, P. A. S. Rocha. “An efficient inelastic approach using SCM/RPHM coupling to study reinforced concrete beams, columns and frames under fire conditions”. *Engineering Structures*, vol. 219, pp. 1-25, 2020.
- [11] Y. B. Yang, S. B. Kuo. *Theory and Analysis of Nonlinear Framed Structures*. Prentice Hall, 1994.
- [12] AISC LRFD. *Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2016.
- [13] C. G. Chiorean. “A Computer Method for Nonlinear Inelastic Analysis of 3D Composite Steel-Concrete Frame Structures”. *J. Eng. Struct.*, vol. 57, pp. 125-152, 2013.
- [14] European Committee for Standardization - EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-2: General rules, Structural Fire Design, 2004.
- [15] European Committee for Standardization - EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules, Structural Fire Design, 2005.
- [16] European Committee for Standardization - EN 1994-1-2:2005. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-2: General rules, Structural Fire Design, 2005.
- [17] A. N. Kordosky, M. M. Drury, S. E. Quiel. “Structural fire resistance of partially restrained, partially composite floor beams, I: Experiments”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 167, pp. 1-19, 2020.
- [18] M. M. Drury, A. N. Kordosky, S. E. Quiel. “Structural fire resistance of partially restrained, partially composite floor beams, II: Modeling”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 167, pp. 1-19, 2020.
- [19] J. -M. Franssen. “A thermal/structural program modelling structures under fire”. *J. AISC.*, vol. 42(3), pp. 143-158, 2005.
- [20] ASTM E119. Standard test methods for fire test of building construction and materials. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2008.
- [21] R. C. Barros, D. Pires, R. A. M. Silveira, I. J. M. Lemes, P. A. S. Rocha. “Numerical advanced analysis of steel-concrete composite beams and columns under fire”. *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*. Prague, 2019.
- [22] R. C. Barros, D. Pires, R. A. M. Silveira, I. J. M. Lemes. “Numerical study of steel-concrete composite structures under fire situation”. *XL Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*. Natal, 2019.