

Análise numérica termomecânica de estruturas expostas ao fogo

Neves, N. S.^{1*}

1 Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

* e-mail: natan.neves@coc.ufrj.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de estruturas de concreto em condição de incêndio. Para tanto, implementações numéricas são desenvolvidas baseada nas formulações do método de elementos finitos. Uma vez que as estruturas estão expostas ao fogo, as propriedades físicas e mecânicas dos materiais são afetadas. Além disso, os elementos estruturais de concreto apresentam reduções significativas na sua capacidade portante e da sua rigidez em consequência do aumento da temperatura. A análise numérica é realizada com base no módulo específico para análise termomecânica em condição de incêndio do programa computacional desenvolvido, denominado de NASEN, considerando a não linearidade geométrica, não linearidade do material e os efeitos dos gradientes térmicos associados em cada fibra da seção transversal. A metodologia de solução baseia-se no acoplamento sequencial de processos numéricos, onde se determina, primeiramente, a distribuição de temperatura no nível da seção transversal dos elementos e em seguida, realiza-se uma análise não linear estrutural. A experimentação numérica é direcionada pelo estudo de uma viga simplesmente apoiada de concreto armado e de aço sob ação do incêndio. A boa avaliação de desempenho do programa na solução para os casos propostos é comprovada pela comparação com as respostas experimentais e numéricas encontradas na literatura.

Palavras-chave: Modelo termo-estrutural, Concreto, Aço, Elementos finitos, Incêndio.

Abstract

This work aims to study the behavior of concrete structures in fire conditions. For this, numerical implementations are developed based on formulations of the finite element method. Once the structures are exposed to fire, the physical and mechanical properties of the materials are affected. In addition, concrete structural elements show significant reductions in their bearing capacity and rigidity as a result of the increase in temperature. The numerical analysis is performed based on the specific module for thermo-structural analysis in fire conditions of the developed computer program, called NASEN, considering the geometric non-linearity, material non-linearity and the effects of the associated thermal gradients in each fiber of the cross-transversal. The solution methodology is based on the sequential coupling of numerical processes, where it is determined, first, the temperature distribution at the level of the cross-section of the elements and then, a non-linear structural analysis is performed. Numerical experimentation is guided by the study of a reinforced concrete and steel beam simply supported under the action of fire. The good performance evaluation of the program in the solution of the proposed cases is confirmed by the comparison with the experimental and numerical responses found in the literature.

Keywords: Thermo-structural model, Concrete, Steel, Finite elements, Fire.

1. Introdução

Devido às inúmeras catástrofes causadas por incêndio ao longo da história, associada ao avanço tecnológico, houve um aumento gradual da demanda nas pesquisas científicas acerca da análise do comportamento de elementos estruturais em condição de incêndio. Para mitigar os danos e perdas provocados pela ação do incêndio foram desenvolvidas normas técnicas visando melhorar a segurança e minimizar os

riscos na elaboração de projetos estruturais, por exemplo, para estruturas aço e concreto em condição de incêndio destaca-se as normas brasileiras e as europeias.

Em geral, as normas apresentam métodos simplificados de cálculo e possibilitam aplicação de métodos avançados para análise dos elementos estruturais expostos ao fogo, bem como o uso de ensaios experimentais. Existem situações de projetos

em que os métodos simplificados não se aplicam adequadamente, sendo necessário recorrer aos procedimentos de análise avançada. Desta maneira, devido aos novos recursos computacionais disponíveis, o uso dessas ferramentas torna-se uma excelente alternativa para verificação do comportamento das estruturas quando expostas a altas temperaturas, possibilitando um melhor custo-benefício, melhorias de projetos, simulação de diferentes tipos de ações e vinculações, verificação de critérios de resistência e segurança [1].

A análise de estruturas em situação de incêndio visa verificar o comportamento dos elementos estruturais sujeitos às solicitações externas diversas e as ações de origem térmica. Sendo que a resposta do sistema estrutural é construída com base na obtenção das tensões, deformações, esforços e deslocamentos associados aos efeitos térmicos e a degradação das propriedades termomecânicas dos materiais em consequência ao aumento de temperatura no interior dos elementos estruturais [2].

Neste contexto, várias pesquisas foram elaboradas na área de desenvolvimento computacional para engenharia de segurança contra incêndio, direcionando avaliações e recomendações importantes para análise do desempenho das estruturas em condição de incêndio [1-4]. Neves [1] apresentou o programa de análise computacional avançada para problemas de engenharia programado em ambiente Matlab, denominado de NASEN. Aplica-se neste estudo o módulo específico para simulação termomecânica de estruturas planas de concreto e/ou aço em situação de incêndio.

2. Modelo Computacional

O modelo computacional implementado para solução do problema termomecânico de estruturas planas expostas a elevadas temperaturas apresenta três aspectos essenciais para simulação numérica dessa natureza. Primeiro realiza-se a modelagem do incêndio, usualmente, respeitando curvas normativas descritas em [5, 6]. Posteriormente, tem-se a análise térmica ao nível seção transversal e, por fim, a obtenção dos deslocamentos na estrutura.

A predição do campo térmico ao nível da seção transversal das estruturas é simulada separadamente do modelo unidimensional de viga-coluna. Sendo assim, com base no princípio da conservação de energia, a equação de governo da condução de calor transiente em meios sólidos [1] é dada pela Eq. (1):

$$\nabla^T \mathbf{D} \nabla T + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde T é a temperatura, Q é uma geração de calor interna, ρ é a massa específica, c é o calor específico, $\mathbf{D} = k\mathbf{l}$ é a matriz de condutividade térmica considerando um material isotrópico. Os comportamentos das propriedades físicas do aço e do concreto em função da temperatura seguem as recomendações descritas em [5,6]. A solução numérica da Equação 1 baseia-se no método dos elementos finitos, conforme detalhado em [1-4]. A temperatura em cada passo é calculada pelas Eqs. (2) e (3).

$$\hat{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{T}}_{n+1} = \hat{\mathbf{B}} \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} + \theta \mathbf{K} \right] \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \left[\frac{\mathbf{C}}{\Delta t} - (1-\theta)\mathbf{K} \right] \tilde{\mathbf{T}}_n + (1-\theta)\mathbf{F}_n + \theta \mathbf{F}_{n+1}$$

Sendo que Δt é o passo de tempo e θ é o parâmetro associado ao esquema temporal, adotado neste trabalho igual 2/3. A análise estrutural é idealizada com base na teoria unifilar de barras, adotando um modelo plano unidimensional de viga-coluna com três graus de liberdade em cada nó, representativos de duas translações e uma rotação. Baseado no princípio dos deslocamentos virtuais, considerando o referencial Lagrangiano atualizado e as hipóteses da teoria de Euler-Bernoulli, a equação incremental é expressa a seguir pela Eq. (3).

$$\{\Delta \mathbf{f}\} = \left[[\mathbf{T}]^T [\mathbf{k}_l] [\mathbf{T}] + [\mathbf{k}_g] \right] \{\Delta \mathbf{u}\} \quad (4)$$

Onde $\{\Delta \mathbf{u}\}$ e $\{\Delta \mathbf{f}\}$ são os vetores incrementais de deslocamento e força respectivamente. Em que a matriz geométrica $[\mathbf{k}_g]$ é responsável pela parcela não linear do problema estrutural, sendo essa matriz descrita por uma teoria simplificada, desprezando o efeito acoplado entre a ação de flexão e axial [7]. Além disso, $[\mathbf{T}]$ é uma matriz de transformação de ordem $[3 \times 6]$ e a matriz de rigidez elástica linear $[\mathbf{k}_l]$ é amplamente conhecida na literatura clássica da análise estrutural. Na construção do vetor de forças globais deve inserir o vetor de engastamento perfeito devido os efeitos de temperatura na estrutura em função do alongamento ε_{th} e o módulo de elasticidade, cuja as componentes são dadas a seguir:

$$P_\theta = \int_A \varepsilon_{th} E_\theta dA \quad M_\theta = \int_A \varepsilon_{th} E_\theta y dA \quad (5)$$

Para realizar a simulação e modelagem do comportamento de elementos estruturais em situação de incêndio, o programa computacional desenvolvido baseia-se em uma estratégia de um acoplamento sequencial. Nessa estratégia realiza-se previamente o cálculo da distribuição de temperatura, onde se

despreza qualquer tipo de acoplamento matemático entre o problema térmico e o problema mecânico. Posteriormente, realiza-se a análise mecânica incluindo corretamente as contribuições dos efeitos térmicos no modelo estrutural. Essa metodologia foi aplicada por vários pesquisadores [1-4], onde realizam a solução sucessiva de dois sistemas de equações em relação a cada intervalo associada ao tempo de exposição ao incêndio. Para exemplificar, a Figura 1 ilustra o esquema global do processo de solução.

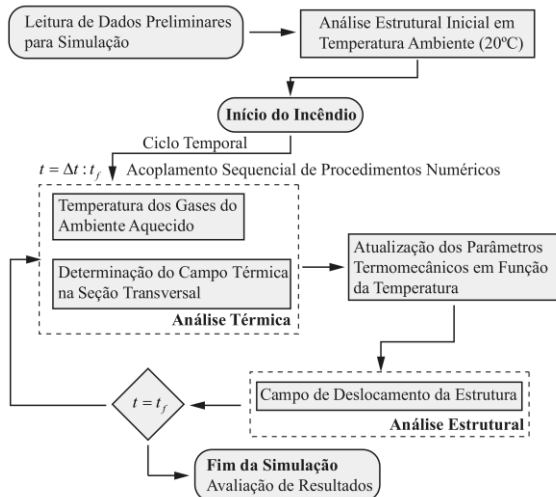


Figura 1: Esquema geral adotado no processo de solução do problema termo-estrutural em situação de incêndio

De forma geral, nos procedimentos numéricos adotados, nota-se que o programa se inicializa com a análise não linear preliminar em relação à estrutura indeformada sujeita apenas as solicitações externas em temperatura ambiente. Na ocorrência do incêndio, para cada intervalo de tempo, a temperatura dos gases do ambiente aquecido pelo fogo é atualizada e determina-se o campo de temperatura na seção transversal obtido pelos procedimentos bidimensional de elementos finitos. Computa-se as propriedades equivalentes associadas à rigidez, capacidade resistente e térmica em função da variação de temperatura e por fim, é realizada a execução da análise mecânica. Ressalta-se que em cada sistema sucessivo de solução, existem processos iterativos para convergências das respostas aproximadas, exigindo atender uma tolerância aceitável.

3. Exemplos Numéricos de Aplicação

Primeiramente, analisa-se uma viga de aço constituída pelo perfil metálico IPE 360 sob ação do incêndio padrão ISO 834 e com momentos aplicados em ambas as extremidades em função do momento de plastificação do perfil (M_p), conforme exposto na Figura 2. Considera-se que o incêndio está atuando somente em três faces do perfil, ou seja, supõe-se que existe uma laje apoiada na mesa superior do perfil atuando

como anteparo adiabático, sendo uma configuração usual em edificações.

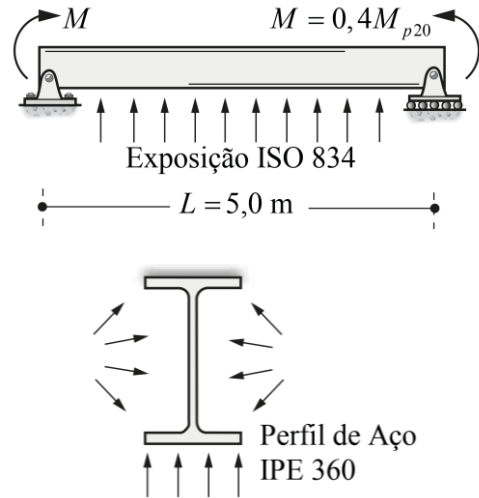


Figura 2: Características do modelo estrutural e da seção transversal da viga de aço

A viga apresenta 5 m de vão e um módulo de elasticidade de 20500 kN/cm². Em relação às condições de contorno, a viga é simplesmente apoiada, sendo que na extremidade direita da estrutura não apresenta restrição de movimento na direção longitudinal. Para discretização do modelo térmico e estrutural, considera-se, para malha da seção transversal, 161 nós e 230 elementos triangulares lineares e 10 elementos unidimensionais de barra. Além disso, os momentos concentrados aplicados nos apoios apresentam um módulo igual a 40% do momento de plastificação do perfil. Para comparação dos resultados estruturais, utilizam-se os dados provenientes de simulações numéricas, encontrados nos trabalhos de Landesmann [3], aplicando o programa PNL-F (Pórtico Não-Linear sob Fogo), de Ribeiro [4], com o programa *Thersys*, de Caldas *et al.* [8], com o programa SAFIR.

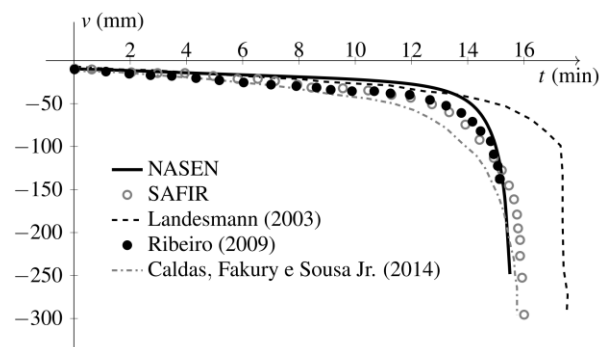


Figura 3: Comparação dos resultados obtidos para deslocamento vertical no meio do vão da viga com momentos aplicados na extremidade em condição de incêndio

Desta maneira, os deslocamentos verticais máximos, medidos no meio vão da viga, em função do tempo de exposição ao incêndio, obtidos pelo

programa NASEN, e comparados com os resultados da literatura são mostrados na Figura 3. Em síntese, pode-se notar que o comportamento do programa NASEN mostra-se próximo aos dados de referência, em exceção da solução obtido por Landesmann [3], que após aproximadamente 14 min, os resultados apresentam uma ligeira diferença entre os modelos.

A segunda aplicação deste trabalho consiste em uma viga de concreto armado biapoiada em situação de incêndio. O aquecimento da estrutura segue o modelo de incêndio padrão ISO 834, tendo somente três faces expostas ao fogo. A viga é solicitada por um carregamento simétrico constituído por duas forças concentradas com módulos iguais a 32,5 kN, localizadas a uma distância de 1,625 m das extremidades da estrutura, conforme ilustrado na Figura 4.

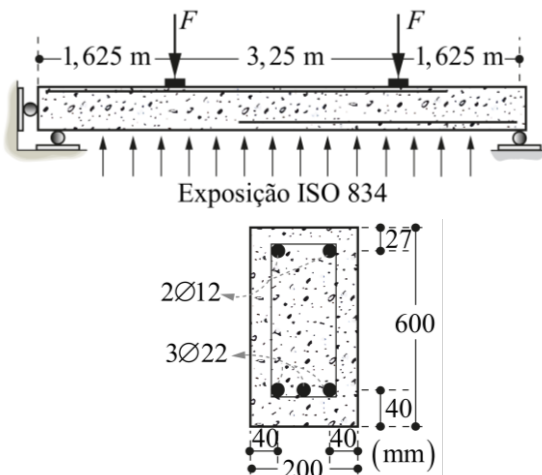


Figura 4: Viga biapoiada de concreto armado com carregamento externo simétrico e detalhamento da seção transversal submetida ao incêndio em três faces

Em relação às propriedades físicas adotadas no exemplo, considera-se uma tensão de escoamento das armaduras e o módulo de elasticidade do aço iguais a 300 MPa e 210 GPa respectivamente. A resistência característica do concreto à compressão foi tomada igual a 15 MPa e adota-se também o concreto contendo agregado silicoso. Em relação aos parâmetros para simulação computacional, considera-se um passo de tempo de 10 segundos, a seção transversal é discretizada em 530 elementos triangulares lineares e a viga foi particionada em 10 elementos finitos unidimensionais.

Na Figura 5 apresenta-se o aumento de temperatura na barra de aço em função do tempo de exposição ao fogo, onde se observa uma boa concordância com os dados experimentais e os resultados numéricos da literatura, conforme visto em Dotreppe e Franssen [9] e Prakash e Srivastava [10].

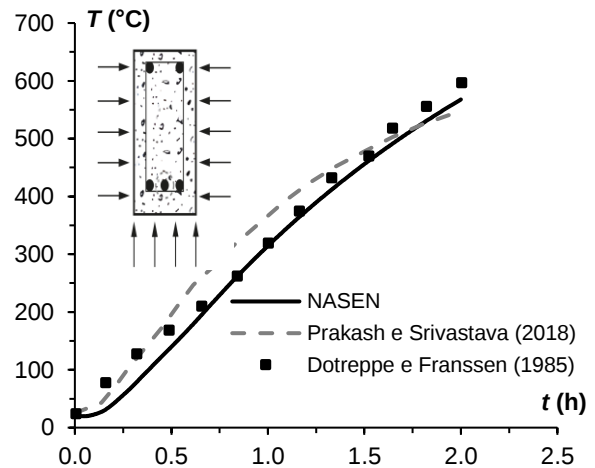


Figura 5: Comparação de resultados para evolução de temperatura na armadura de aço da seção transversal

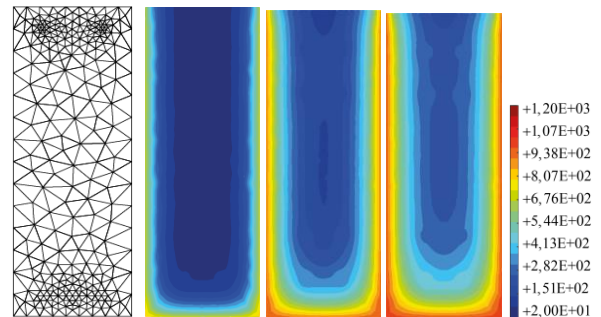


Figura 6: Distribuição bidimensional de temperatura (°C) na seção transversal da viga de concreto armado para 30, 90 e 120 min de exposição ao fogo

Após verificar o desempenho satisfatório do programa NASEN para predição da temperatura ao nível da seção transversal, busca-se verificar o comportamento mecânico da viga em condições de altas temperaturas. Além das referências utilizadas anteriormente na análise térmica, utilizam-se os resultados do programa SAFIR, sendo que os dados da simulação do programa são extraídos no trabalho de Prakash e Srivastava [10].

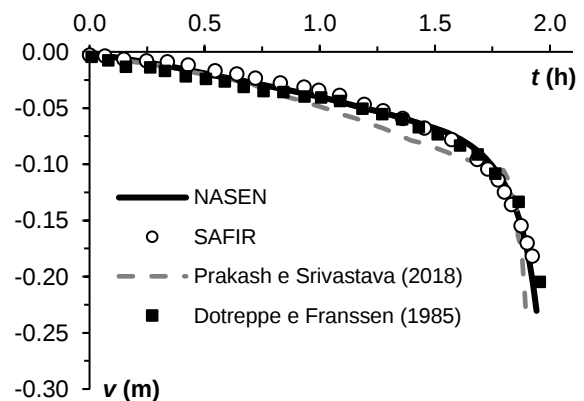


Figura 7: Curva de deslocamento vertical no centro da viga simplesmente apoiada de concreto

O comportamento mecânico é direcionado pela análise da deflexão no meio vão da viga de concreto armado. Sendo assim, a Figura 7 apresenta o histórico de deslocamento ao longo do tempo de exposição ao incêndio. Os resultados obtidos com o programa desenvolvido na presente pesquisa mostram um comportamento parecido em relação ao ensaio experimental. Em comparação aos resultados numéricos, o programa NASEN apresenta um comportamento similar com SAFIR. Nota-se também que a estrutura foi exposta ao fogo por aproximadamente 2 horas, atingindo um deslocamento em torno de 23 cm.

4. Conclusão

Este trabalho descreveu aspectos de interesse relacionados à implementação numérica na engenharia, visando apresentar a aplicação de um programa computacional capaz de simular o comportamento para uma viga de aço e de concreto armado em situação de incêndio. Em linhas gerais, os resultados obtidos com programa NASEN apresentaram boa aproximação em comparação as previsões encontradas na literatura para caso teste analisado. Em adicional, sucessivos aprofundamentos e generalizações das formulações do modelo computacional são propostas de pesquisas futuras, visando ampliar a área aplicação dos módulos computacionais.

5. Referências

- [1] NEVES, N. S. *Modelo computacional avançado para análise de estruturas sob ação de gradientes térmicos*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2019.
- [2] CALDAS, R. B. *Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2008.
- [3] LANDESMANN, A.; BATISTA, E. M.; ALVES, J. L. D. Implementation of advanced analysis method for steel-framed structures under fire conditions. *Fire safety journal*, v. 40, n. 4, p. 339-366, 2005.
- [4] RIBEIRO, J. C. L. *Desenvolvimento e aplicação de um sistema computacional para simulação via Método dos Elementos Finitos do comportamento de estruturas de aço e mistas em situação de incêndio*. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.
- [5] Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1-2: General rules-structural fire design. European Standards, London, CEN, Brussels, Belgium. 2004.
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-2: General rules - structural fire design. European Standards, London, CEN, Brussels, Belgium. 2005.
- [7] PORTER, F. L.; POWELL, G. H. *Static and dynamic analysis of inelastic frame structures*. University of California, College of Engineering, Earthquake Engineering Research Center, 1971.
- [8] CALDAS, R. B.; FAKURY, R. H.; SOUSA JR, J. B. M. Finite element implementation for the analysis of 3d steel and composite frames subjected to fire. *Latin American Journal of Solids and Structures*, SciELO Brasil, v. 11, n. 1, p. 1–18, 2014.
- [9] DOTREPPE, J.C.; FRANSSEN, J.-M. The use of numerical models for the fire analysis of reinforced concrete and composite structures. *Engineering analysis*, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 67–74, 1985.
- [10] PRAKASH, P. R.; SRIVASTAVA, G. Nonlinear analysis of reinforced concrete plane frames exposed to fire using direct stiffness method. *Advances in Structural Engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 21, n. 7, p. 1036–1050, 2018.