

Desenvolvimento e validação de código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio

Ronaldo Rigobello¹, Jorge Munaiar Neto², Humberto Breves Coda³

Resumo

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de código computacional com vistas a simular o comportamento de estruturas aporticadas de aço em situação de incêndio. As simulações com o referido código empregam elementos finitos de pórtico não linear de formulação posicional, a qual utiliza como graus de liberdade as posições dos nós dos elementos finitos resultando em uma descrição intrinsecamente não linear do comportamento geométrico das estruturas. Adota-se uma lei constitutiva tridimensional completa e a cinemática de Reissner, de modo que o modelo de plasticidade considera o efeito combinado das tensões normais e cisalhantes para verificação do critério 3-D de plasticidade. Em temperaturas elevadas, a degradação das propriedades dos materiais é levada em consideração nas análises para se avaliar o desempenho de uma dada estrutura de interesse durante a ocorrência do incêndio, até que o colapso estrutural seja verificado. Os resultados obtidos indicam a capacidade de o referido código simular satisfatoriamente o comportamento de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio.

Palavras-chave: Estruturas de aço aporticadas. Incêndio. Análise térmica. Análise termoestrutural. Análise não linear. Método dos elementos finitos posicional.

¹ Professor Doutor da Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. BR 369 - km 0,5, CEP: 87301-006 - Caixa Postal 271, Campo Mourão, PR, Brasil. E-mail: ronbello@gmail.com (autor correspondente)

² Professor Doutor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas - Avenida Trabalhador Sãocarlense, 400 -13566-590, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: jmunaiar@sc.usp.br,

³ Professor Titular da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas - Avenida Trabalhador Sãocarlense, 400 -13566-590, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: hbcoda@sc.usp.br

1 Introdução

A análise do comportamento de estruturas de aço em situação de incêndio vem ganhando cada vez mais importância nos projetos estruturais. Devido à sua complexidade, não é possível avaliar o comportamento estrutural global por meio de procedimentos de cálculo simplificados. Além disso, a realização de ensaios em laboratórios, em geral, possui limites práticos e econômicos. Diante desses fatos, o desenvolvimento de modelos numéricos, geralmente com base no método dos elementos finitos e que permitam simular adequadamente o comportamento das estruturas em situação de incêndio, tem sido bastante estimulado.

Com relação à análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio, códigos computacionais (programas de computador) com modelos de plasticidade distribuída têm sido tradicionalmente utilizados. Uma revisão dos principais códigos desenvolvidos nesse contexto pode ser vista em Wang (2002) e em Caldas (2008). Nessa categoria, os principais códigos existentes podem ser divididos em generalistas (pacotes comerciais) e especialistas. Dentre os códigos “generalistas” são citados o Ansys, Abaqus e Diana. Dentre os códigos “especialistas” para análises de estruturas em situação de incêndio são citados o SAFIR (Franssen 2003), o Vulcan (HUANG et al. 2004; Yu et al. 2010) e o Adaptic (IZZUDDIN and ELNASHAI 1989; IZZUDIN et al. 2000).

Além dos códigos computacionais que, em geral, utilizam modelos de plasticidade distribuída com um modelo de fibras seccional no desenvolvimento dos elementos finitos de pórtico, vários outros trabalhos utilizando modelos de rótulas plásticas vêm sendo desenvolvidos como, por exemplo, Ma and Liew (2004), Landesmann et al. (2005), Souza Junior and Creus (2007), dentre outros.

Dentro do contexto dos códigos com modelo de plasticidade distribuída, aqui se apresenta um código computacional para simulação do comportamento de estruturas aporticadas de aço em situação de incêndio, denominado SYSAF. O comportamento estrutural é simulado com o SYSAF por meio do emprego de elemento finito de pórtico laminado não linear de formulação posicional, conforme apresentado em Coda and Paccola (2010). A formulação posicional do referido elemento finito têm por base a posição dos nós dos elementos finitos, ao invés de deslocamentos, e tem como principal característica ser de natureza não linear geometricamente exata.

Com vistas à realização de análises termoestruturais, o código permite a realização de análises térmicas transientes, via método dos elementos finitos, para a determinação dos campos de temperatura nos perfis de aço da estrutura. Assim, numa análise sequencial, a influência da

temperatura nas propriedades do material é levada em consideração para avaliar o desempenho da estrutura, em cada instante determinado do incêndio, até que se verifique o colapso. São apresentadas análises de casos presentes na literatura para validar os resultados obtidos com o código computacional em questão. Os resultados obtidos comprovam a eficácia do código desenvolvido quando aplicado em análises de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio.

2 Aspectos gerais e formulação

2.1 Processo de desenvolvimento da análise termoestrutural

Uma análise termoestrutural em situação de incêndio consiste basicamente na análise do comportamento de uma dada estrutura sob temperaturas elevadas em que são levados em conta os efeitos da ação térmica provenientes dessa situação. A estratégia adotada neste trabalho para esse tipo de análise pode ser dividida em três fases. A primeira fase do processo consiste numa análise estrutural inicial, para determinação dos deslocamentos e esforços presentes na estrutura antes da ocorrência do suposto incêndio.

A segunda fase consiste na determinação do campo de temperaturas na seção transversal dos elementos da estrutura afetados durante a ocorrência do incêndio. Nessa fase, as análises realizadas por meio do SYSAF consideram a variação das propriedades térmicas dos materiais em função do aumento da temperatura. A partir dos resultados obtidos na análise térmica é possível determinar a variação das propriedades mecânicas (resistência e rigidez) e térmicas (alongamento relativo) dos materiais em função da temperatura para serem levados em conta na análise estrutural, estabelecendo uma conexão entre as análises térmica e estrutural.

Por fim, na terceira fase (análise estrutural em temperaturas elevadas) utiliza-se o SYSAF para obtenção dos deslocamentos e esforços na estrutura considerando-se a degradação das propriedades dos materiais, obtidos em função da temperatura, em cada instante considerado da duração do incêndio. O fluxograma simplificado do processo descrito pode ser visto por meio da Figura 1.

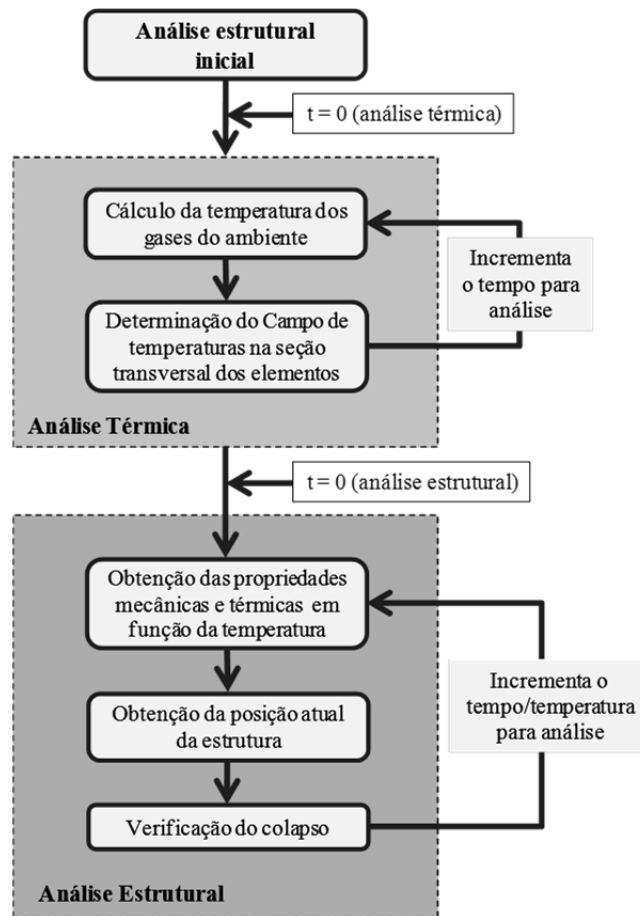


Figura 1: Fluxograma simplificado do processo de obtenção da solução de uma análise termoestrutural em situação de incêndio.

2.2 Análise térmica

As análises térmicas com o SYSAF têm por base a Equação clássica (1) denominada *Equação Diferencial da Difusão (ou condução)* de calor em sólidos. Na Equação (1), c é o calor específico, ρ é massa específica e λ a condutividade térmica. A variável q se refere a uma geração de calor interno q por unidade de tempo, distribuída no volume considerado. T é a variável temperatura (Kelvin) e t é o tempo. Considerando-se a discretização de um domínio Ω de interesse em elementos finitos e lançando-se mão do método dos resíduos ponderados com a consideração adequada das condições de contorno, se obtém a Equação (2) que descreve, de forma matricial, o equilíbrio dos fluxos de calor do domínio considerado em um dado instante.

$$\rho c \frac{dT}{dt} - \lambda \nabla^2 T - q = 0 \quad (1)$$

$$[C]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} + [K]\{T\} = \{F\} \quad (2)$$

Com relação à Equação (2), têm-se: $[C]$ matriz de capacidade calorífica, $[K]$ matriz de rigidez térmica e $\{F\}$ vetor de fluxo de calor nodal. Na Equação (2) $[C]$, $[K]$ e $\{F\}$ são conhecidos, enquanto $\{T\}$ é o vetor dos parâmetros desconhecidos (no caso, as temperaturas que se deseja determinar). Para solução da Equação (2) é necessário discretizar o operador diferencial envolvendo o termo dependente do tempo (ou transiente). Para tanto, é utilizada uma aproximação numérica do termo transiente com base no *Método das Diferenças Finitas*, com estratégia similar àquela apresentada em Huang and Usmani (1994) e Lewis et al. (2004).

Os elementos finitos disponibilizados para análises térmicas bidimensionais são os elementos isoparamétricos TT3 (elemento térmico triangular de 3 nós), o TQ4 (elemento térmico quadrilateral de 4 nós), o TT10 (elemento térmico triangular de 10 nós) e o TS2 (elemento térmico de dois nós de efeitos de superfície). A Figura 2 ilustra os elementos finitos mencionados.

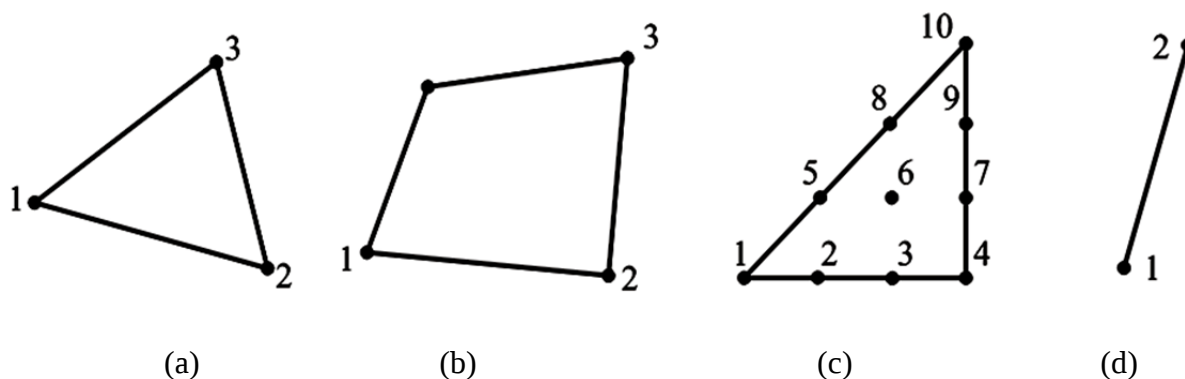


Figura 2: Elementos finitos disponíveis para análises: (a) Elemento finito TT3; (b) Elemento finito TQ4; (c) Elemento finito TT10 e (d) Elemento finito TS2.

No entanto, para fins de análise termomecânica, as análises térmicas são realizadas utilizando-se apenas elementos finitos do tipo TT10, pois a seção transversal dos elementos estruturais na análise mecânica são necessariamente discretizadas com elementos triangulares cúbicos de 10 nós (ver item 2.3, Figura 4). Vale mencionar ainda que o elemento finito TS2 é um elemento utilizado somente pelo código para geração dos efeitos de convecção e radiação nos nós de um segmento de contorno que possa vir a ser definido pelo usuário.

2.3 Análise mecânica

O comportamento estrutural é simulado com o código SYSAP por meio do emprego de elemento finito de pórtico laminado não linear de formulação posicional, conforme apresentado em Coda and Paccola (2010). Diferentemente das formulações usuais para elementos de pórtico tridimensionais, não se utilizam esquemas de rotação finita, como o de Euler-Rodrigues, por exemplo. Tais estratégias usualmente são aplicadas à formulações corrotacionais, e são extensão da teoria linear para representar grandes rotações e possuem natureza necessariamente incremental.

A estratégia adotada no desenvolvimento do referido elemento finito consiste na descrição dos sólidos por meio de vetores generalizados não-restritos. O mapeamento do contínuo é feito por meio de vetores não unitários que não mantêm a ortogonalidade entre si após a mudança de configuração de um corpo, diferentemente do que se utiliza nas formulações clássicas. Desta maneira, as mudanças de forma da seção transversal do elemento não são necessariamente normais à linha de referência assumida.

Na Figura 3 se faz a esquematização típica do mapeamento para um elemento de pórtico, para as configurações iniciais e atuais para um sólido curvo com aproximação cúbica (no sentido longitudinal da linha de referência) e que apresenta uma geometria plana no sentido transversal. Embora represente um elemento de aproximação cúbica, o referido elemento é de aplicação mais geral, pois permite ao usuário escolher a ordem desejada da aproximação.

As variáveis f e A na Figura 3 representam, respectivamente, a descrição Lagrangeana da função mudança de configuração e seu gradiente. Da mesma forma, $(f^0; f^1)$ e $(A^0; A^1)$ representam, respectivamente, os mapeamentos e seus gradientes do espaço adimensional para as configurações inicial (0) e atual (1).

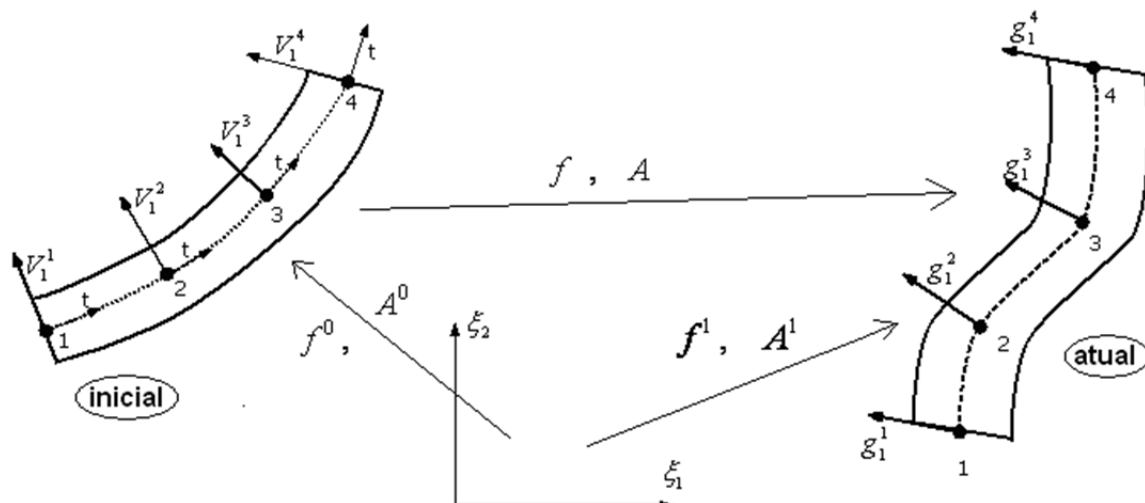


Figura 3: Mapeamento das configurações inicial e atual do elemento, com relação ao espaço adimensional (ξ_1 e ξ_2).

São considerados, na hipótese cinemática básica do elemento de pórtico, modos de empenamento e deformação com variação na direção transversal. O mapeamento resultante representa um sólido longo, por meio de um elemento de pórtico. Tal mapeamento utiliza somente variáveis vetoriais no espaço Euclidiano e, conseqüentemente, valores de tensão, deformação e posição são medidas objetivas, isto é, independentes de translação e rotação de corpo rígido. Têm-se assim 12 graus de liberdade para cada nó, no caso, três translações (Y_{li}^m), seis componentes vetoriais (g_{li}^1 e g_{li}^2), dois valores de intensidade da taxa de deformação nas direções transversais (A_ℓ^1 e A_ℓ^2) e intensidade do empenamento (w_ℓ). Maiores detalhes sobre a formulação do referido elemento podem ser vistos em Coda and Paccola (2010) e em Rigobello et al. (2010).

Para a discretização da seção transversal se adota mapeamento bidimensional feito por meio de elementos finitos triangulares isoparamétricos de aproximação cúbica, conforme esquematizado na Figura 4. Nessa mesma Figura 4 é esquematizada a particularidade de que apenas na configuração inicial do corpo analisado os vetores generalizados resultam unitários e ortogonais à linha de referência, ressaltando-se que para a configuração atual, podem não ser. Esta é a principal característica do mapeamento com vetores não-restritos.

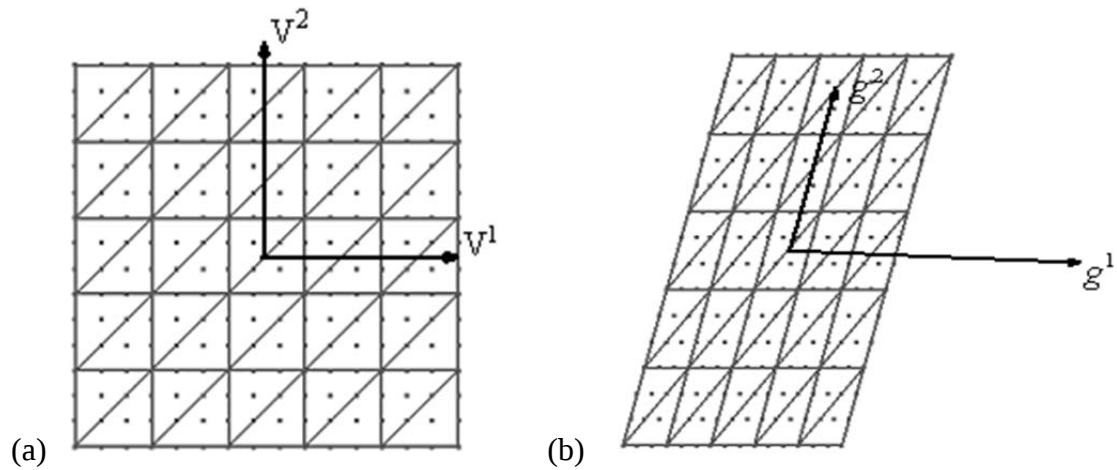


Figura 4: Definição geral da geometria de uma seção transversal.

(a) Configuração Inicial e (b) Configuração atual.

2.4 Técnica de solução do problema mecânico não linear geométrico

A técnica de solução do problema mecânico não linear geométrico tem por base o princípio da mínima energia potencial total. A energia potencial total (Π) é descrita pela Equação (3), em que F é o vetor de forças externas conservativas aplicadas, Y é o vetor posição (incluindo todos os graus de liberdade) e ϕ é o potencial de energia livre de Helmholtz que inclui a energia de deformação e a restituição da dissipação plástica, ambas dependentes da temperatura, Equação (4). Cabe comentar que a medida de deformação adotada é a de Green ($\mathbf{E}$), e que grandes deformações podem ser contempladas desde que limitadas a valores onde não ocorra degeneração material.

$$\Pi = \int_{V_0^{el}} \phi dV_0^{el} - F_{nod\ j} Y_{nod\ j} \quad (3)$$

$$\phi = \phi(\mathbf{E}_e, \mathbf{E}_p, \alpha(T), \sigma_0(T), \mathbf{C}(T), \mathbf{H}(T)) \quad (4)$$

Na Equação (4), $\mathbf{E}_e$ e $\mathbf{E}_p$ são as parcelas elástica e plástica da deformação de Green, $\alpha(T)$ é o coeficiente de dilatação térmica dependente da temperatura, $\mathbf{C}(T)$ é o tensor constitutivo elástico dependente da temperatura, $\sigma_0(T)$ é a resistência limite do material dependente da temperatura e $\mathbf{H}(T)$ é o encruamento do material também dependente da temperatura. A condição

de equilíbrio é atingida, para determinado nível de temperatura, pela minimização da energia potencial total, feita com o clássico procedimento de Newton-Raphson, o qual não será aqui apresentado por transcender os objetivos do presente trabalho.

2.5 Regra e critério de plasticidade

A plasticidade do material aço é assumida segundo o critério de von Mises. A regra de fluxo adotada é a da “*plasticidade não associativa*” e o encruamento é assumido como “*isotrópico*”. Maiores informações sobre a formulação do código quanto ao tratamento da plasticidade pode ser vista de maneira detalhada em Botta et al. (2008).

Ao se adotar uma lei constitutiva tridimensional completa e cinemática de Reissner, as simulações com esse elemento consideram o efeito combinado das tensões normais e cisalhantes para verificação do critério de resistência 3-D na plasticidade. Como limitação, vale mencionar que não é possível se detectar falha por perda de estabilidade local nas simulações com o elemento finito de pórtico utilizado, razão pela qual enriquecimentos adicionais de graus de liberdade devem ser implementados.

3 Exemplos de validação numérica

3.1 Pilares de aço em situação de incêndio

Este exemplo foi apresentado anteriormente em Landesmann et al. (2005) e consiste da simulação do comportamento de pilares simplesmente apoiados, considerando perfis IPE-360 com 4 metros de comprimento, expostos ao modelo de incêndio-padrão ISO-834. Os dois modelos analisados são ilustrados por meio das Figuras 5a e 5b, extraídas de Landesmann et al. (2005), nas quais são também apresentados os carregamentos aplicados aos pilares, bem como as condições de exposição ao modelo de incêndio-padrão. As solicitações N e M consistem de parcelas da resistência do pilar à temperatura ambiente N_{y20} (resistência à compressão) e M_{p20} (resistência a flexão), respectivamente.

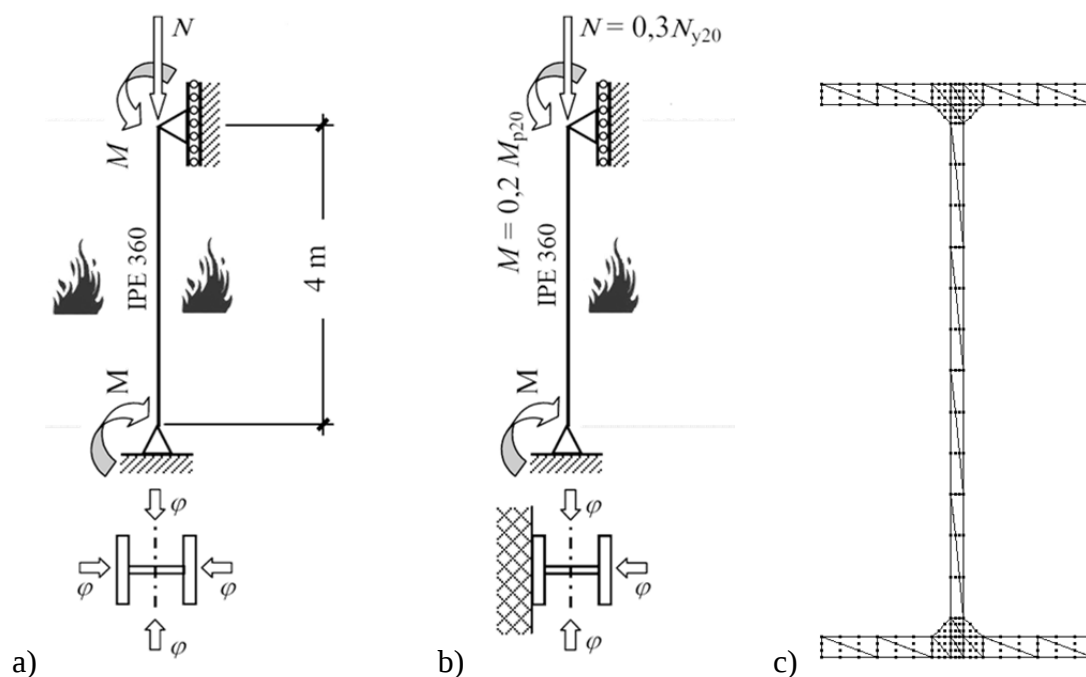


Figura 5: Modelos de pilares biapoiados expostos ao incêndio: a) seção com as quatro faces expostas; b) seção com três faces expostas; c) Malha da seção transversal.

Num primeiro cenário o pilar é considerado aquecido por todos os lados do perfil (Figura 5a) e, em um segundo cenário, é considerado aquecido por apenas três lados (Figura 5b). De acordo com Landesmann et al. (2005), esta situação representa um pilar de fachada onde uma das mesas é protegida parcialmente da ação do fogo. O elemento é discretizado longitudinalmente com quatro elementos finitos cúbicos. A malha da seção transversal é apresentada na Figura 5c.

Os resultados obtidos com os códigos SAFIR e SAAFE (Landesmann et al. 2005), bem como aqueles obtidos com o código SYSAF, para os modelos aquecidos por três e quatro faces, são apresentados na Figura 6. Vale ressaltar que, em relação à plasticidade, o código SAAFE emprega o conceito de plasticidade concentrada (rótulas plásticas), enquanto que os códigos SAFIR e SYSAF empregam o conceito de plasticidade distribuída.

Por meio da análise da Figura 6 pode-se observar, como esperado, a proximidade dos resultados obtidos com os códigos SYSAF e SAFIR, se distanciando um pouco daqueles obtidos com o código SAAFE, que tem por base o conceito de rótulas plásticas. Tais resultados demonstram a potencialidade do código SYSAF na análise de elementos submetidos à flexão composta submetidos a temperaturas elevadas.

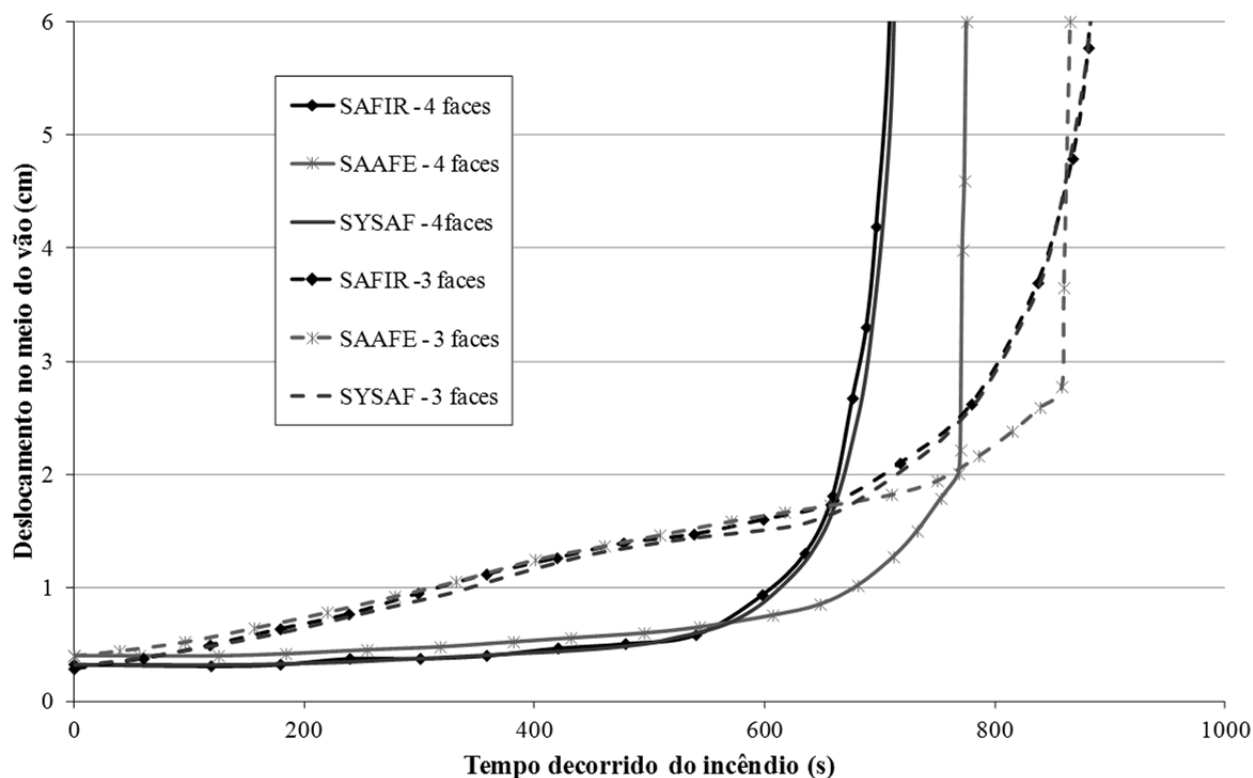


Figura 6: Deslocamento no meio do vão para os pilares esquematizados na Figura 5, expostos ao modelo de incêndio-padrão.

3.2 Pórtico tridimensional de aço de dois andares com seções tipo H

O pórtico do exemplo em questão, cuja geometria e condições de contorno são ilustradas por meio da Figura 7, foi analisado numericamente em Souza Junior and Creus (2007). Todas as seções consideradas são do tipo H 150x150x7x10, e o material aço possui resistência ao escoamento igual a 325 MPa. A carga F aplicada previamente ao aquecimento das seções é igual a 250 kN. A relação constitutiva do material em temperaturas elevadas é determinada segundo o CEN EN 1993-1-2:2005.

Um incêndio na parte inferior da estrutura é simulado aquecendo-se uniformemente todos os pilares e todas as vigas até o nível do 2º piso. Cada elemento estrutural, pilar ou viga, foi discretizado com quatro elementos finitos cúbicos. Os resultados dos deslocamentos dos pontos de aplicação das cargas H1 e H2, obtidos com os códigos SYSAF e ANSYS, bem como aqueles obtidos em Souza Junior and Creus (2007) com o código SAFIR, podem ser vistos na Figura 8.

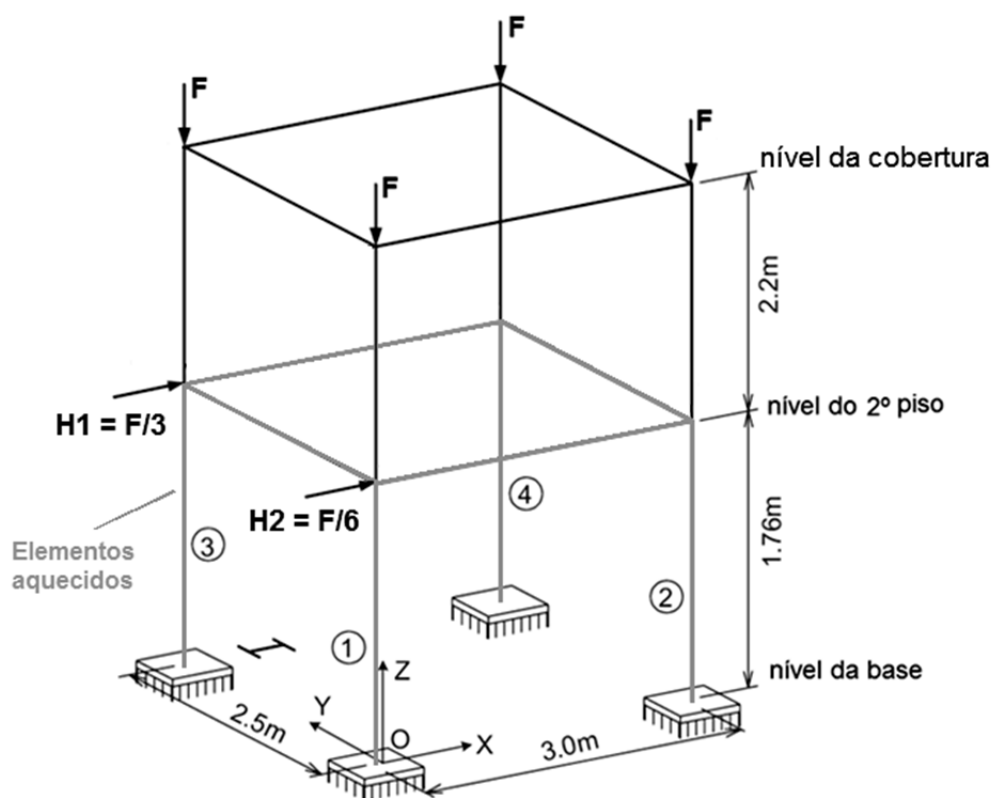


Figura 7: Geometria e condições de contorno do pórtico tridimensional de aço de dois andares com seções tipo H. Figura adaptada de Souza Junior and Creus (2007).

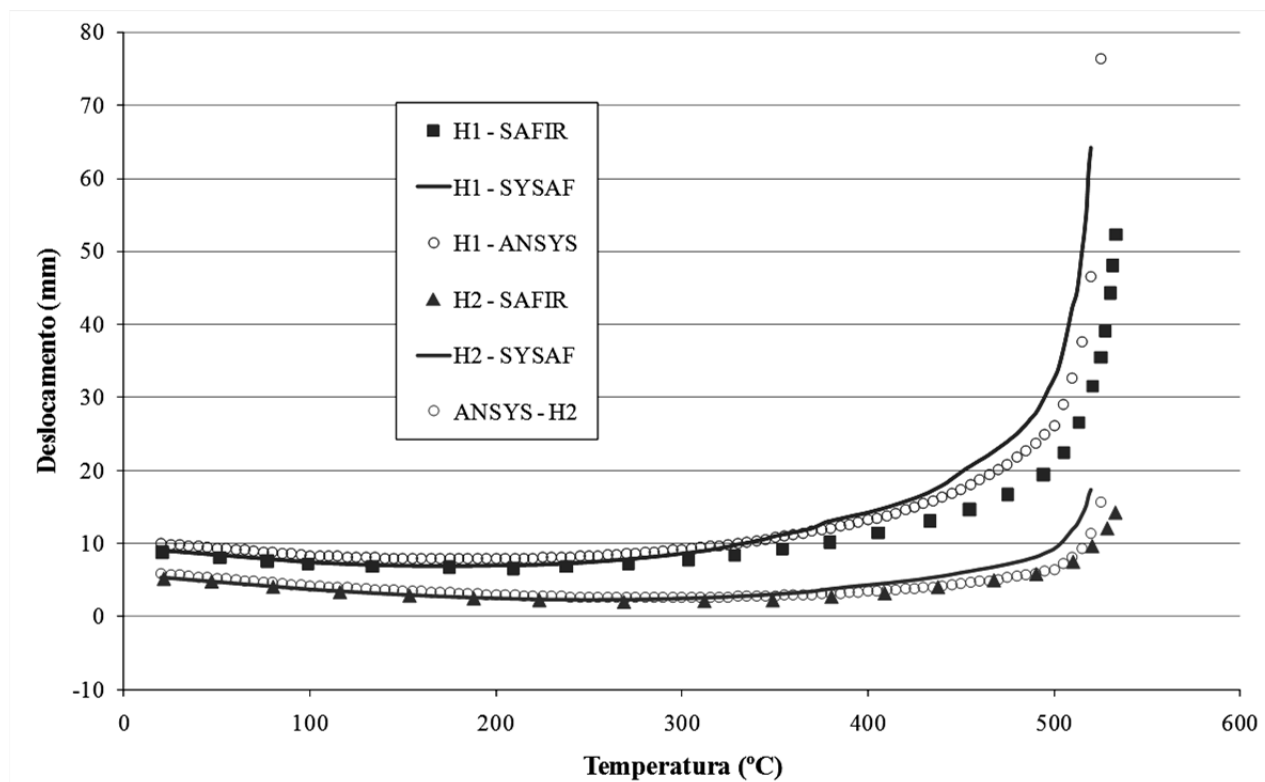


Figura 8: Deslocamentos H1 e H2 em função da temperatura dos elementos.

Comparando os resultados obtidos com os códigos SAFIR, SYSAF e ANSYS, nota-se que os resultados obtidos com o SYSAF se apresentam mais próximos daqueles obtidos com o ANSYS. Vale ressaltar que a diferença em relação ao SAFIR foi da ordem de apenas 2,5 %, o que caracteriza o bom desempenho do SYSAF nessa análise.

4 Conclusões

Este trabalho buscou apresentar um código computacional para análise de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio denominado SYSAF, que emprega elementos finitos de pórtico de formulação posicional. A formulação posicional do referido elemento tem por base a posição dos nós dos elementos finitos, ao invés de deslocamentos, e tem como principal característica ser de natureza não linear geometricamente exata. Além disso, as simulações com esse elemento consideram o efeito combinado das tensões normais e cisalhantes para verificação do critério de resistência 3-D na plasticidade. Tais aspectos diferenciam a formulação do elemento de pórtico do código apresentado com relação àqueles presentes nos principais códigos desenvolvidos para análise de estruturas em situação de incêndio.

Por utilizar 12 graus de liberdade por nó e ser de natureza intrinsecamente não linear, o que é uma vantagem, a formulação do elemento finito de pórtico utilizado tem como desvantagem um custo computacional maior que as formulações convencionais, com base em deslocamentos e giros. No entanto, é um preço adequado para a utilização de uma formulação exata, sem aproximações com relação à consideração da não linearidade geométrica. Os resultados que vêm sendo obtidos em análises de exemplos presentes na literatura, além daqueles apresentados neste trabalho, indicam que o código apresentado é capaz simular satisfatoriamente o comportamento de estruturas de aço aporticadas em situação de incêndio.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia São Carlos/USP, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte direcionado ao presente trabalho.

6 Referências

- BOTTA, A.S.; PACCOLA, R.R.; VENTURINI, W.S. and Coda, H.B. (2008). A discussion on volume change in the plastic phase. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, n. 24, p. 1149–1162.
- CALDAS, R.B. (2008). Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio. Tese de Doutorado (Ph.D. Dissertation), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CODA, H. B. and PACCOLA, R. R. (2010) Improved finite element for 3D laminate frame analysis including warping for any cross section. *Applied Mathematical Modelling*, v. 34, n. 4, p. 1107-1137.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN (2005). Eurocode 3 - Design of Steel Structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design. EN 1993-1-2:2005. Brussels.
- FRANSSEN, J-M. (2003). SAFIR: A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire. In: NASCC 2003. Proceedings of NASCC 2003.
- HUANG, H. C. and USMANI, A. S. (1994). Finite Element Analysis for Heat Transfer. Springer-Verlag.
- HUANG, Z.; BURGESS, I. W. and PLANK, R. J. (2004). 3D modeling of beam-columns with general cross-sections in fire. In Proceedings of 3rd International Workshop on Structures in Fire, SIF 2004.
- IZZUDDIN, B. A. and ELNASHAI, A. S. (1989). ADAPTIC: A Program for the Adaptive Dynamic Analysis of Space Frames. Tech Report No. ESEE-89/7, Imperial College, London.
- IZZUDDIN, B.A.; SONG, L.; ELNASHAI, A. S. and DOWLING, P.J. (2000). An integrated adaptive environment for fire and explosion analysis of steel frames. Part II: verification and application. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 53, n. 1, p. 87–111.

LANDESMANN, A.; BATISTA, E. M. and ALVES, J.L.D. (2005). Implementation of Advanced Analysis Method for Steel Framed Structures under Fire Conditions. *Fire Safety Journal*, v. 40, n. 4, p. 339-366.

MA, K.Y. and LIEW, J.Y.R. (2004) Nonlinear Plastic Hinge Analysis of Three-Dimensional Steel Frames in Fire. *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n. 7, p. 981-990.

LEWIS, R.W.; NITHIARASU, P. and SEETHARAMU, K. N. (2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons Ltd.

RIGOBELLO, R.; MUNAIAR NETO, J. and CODA, H. B. (2010). Análises inelásticas de estruturas de aço com elemento finito de pórtico laminado não linear. in: *MECOM 2010 / CILAMCE 2010. Mecânica Computacional v. XXIX*, p. 7503-7527, Buenos Aires.

SOUZA JUNIOR, V. and CREUS, G. J. (2007). Simplified elastoplastic analysis of general frames on fire. *Engineering Structures*, v. 29, n. 4, p. 511-518.

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

YU, C.; HUANG, Z.; BURGESS, I.W. and PLANK, R. J. (2010). Development and Validation of 3D Composite Structural Elements at Elevated Temperatures. *Journal of Structural Engineering*, v. 136, n. 3, p. 275-284.

Development and validation of computer code for steel frame analysis in fire

Abstract

This paper presents the development of a computer code to simulate the behavior of steel framed structures in fire. Simulations with the referred code use non-linear frame finite elements based on positions. This formulation uses the nodes positions as degrees of freedom resulting in an inherently non-linear description of the geometric behavior of the structures. A complete three-dimensional constitutive law and Reissner kinematics are adopted, so that the plasticity model considers the combined effect of normal and shear stresses for verifying 3-D plasticity criterion. At high temperatures, the degradation of material properties is taken into account in the analysis to evaluate the performance of the structure during the occurrence of fire, until the collapse occurs. The results show the good precision of the developed code regarding the behaviour of steel framed structures in fire situation.

Keywords: Steel framed structures. Fire. Thermal analysis. Thermo-structural analysis. Nonlinear analysis. Positional finite element method.

1 Introduction

The behavior of steel structures in fire has been gaining increasing importance in structural design. Due to its complexity, it is not possible to evaluate the overall structural behavior through simplified schemes. In addition, laboratory tests have practical and economic limits. Due to these reasons, the development of numerical models to properly simulate the behavior of structures in fire has been greatly stimulated. Within the context of the codes with distributed plasticity model, here is presented a computational code for steel frame analysis in fire called SYSAP. The structural behavior is simulated with SYSAP through the use of nonlinear frame finite elements based on positions as developed by Coda and Paccola (2010). With the computer code in question, transient thermal analyses with basis on the finite element method can be performed for the determination of temperature fields in the steel profiles of the structure. Then, by means of a sequential analysis, the influence of temperature on the properties of the material is considered to evaluate the structural performance during the fire occurrence until the collapse verification.

2 General aspects and Formulation

2.1 Thermo-structural analysis procedure

The adopted strategy for this type of analysis can be divided into three phases. The first phase consists of an initial structural analysis to determine the displacements and stress state in the structure before the occurrence of fire.

The second phase consists of a transient thermal analysis for determining the temperature field in the cross section of the structure elements affected by the fire.

From the thermal analysis results, the variation of mechanical properties (strength and stiffness) and thermal (relative elongation) of the materials due temperature change can be considered in structural analysis (third phase), establishing a connection between the thermal and structural analysis (thermo-structural analysis). The flowchart concerning the mentioned phases can be seen in Figure 1.

2.2 Thermal analysis

Thermal analysis using the SYSAF are based on the classical Equation (1) called the diffusion (or conduction) equation of heat in solids. The finite elements available for two-dimensional thermal analysis are presented in Figure 2. However, for thermo-structural analysis, the thermal analysis are performed using only the TT10 finite element, since the cross section of structural elements in mechanical analysis are discretized by cubic triangular elements with 10 nodes (see Section 2.3, Figure 4).

2.3 Mechanical analysis

The structural behavior is simulated with SYSAF through the use of non-linear frame finite element of positional formulation developed by Coda and Paccola (2010).

The strategy adopted in the development of this finite element is the description of solids by means of generalized non-restricted vectors. The continuous mapping is done through generalized vectors, non-unitary and not orthogonal among each other. These characteristics provide a different configuration change, unlike the classical formulations. Thus, changes in shape of the elements cross sections are not necessarily orthogonal to the reference line.

The proposed kinematic results in 12 degrees of freedom per node, three translations (Y_{ti}^m), six unconstrained vector components ($g_{i\ell}^1$ e $g_{i\ell}^2$), two values of the thickness strain variation intensity (λ_ℓ^1 e λ_ℓ^2) and the intensity of warping (w_ℓ).

Solution technique of the nonlinear geometric mechanical problem

The solution technique is based on the minimum potential energy theorem regarding nodal parameters. The potential energy is written according to Equation (3) and derived regarding the nodal parameters, which results the equilibrium equation. To solve the equilibrium the well known Newton-Rapson procedure is employed.

Plasticity rules and criteria

The plasticity of steel is assumed according to von Mises criterion. The flow rule adopted is non-associative and the hardening is assumed isotropic. More information about the plasticity formulation used in the computational code can be seen in detail in Botta et al. (2008). By adopting a complete three-dimensional constitutive law and Reissner kinematics, the simulations with this element considers the combined effect of normal and shear stresses for checking the resistance in 3-D plasticity.

3 Numerical examples

Two numerical examples were presented to explore the capacity of the developed computer code to analyze steel frames in fire situation. The first one consists of a beam-column exposed to fire by three and four faces (Figure 5), presented in Landesmann et al. (2005) and analyzed with the codes SAFIR and SAAFE (a plastic hinge based computer code). The results obtained with the SYSAF are close with those obtained with the SAFIR, as can be seen in Figure 6, indicating the applicability of the SYSAF code to the analysis of components subjected to bending and axial loading in case of fire.

The second example consists of a tridimensional frame shown in Figure 7 and first analyzed in Souza Junior and Creus (2007) with the SAFIR code. The horizontal displacements in the points of application of loads H1 and H2, given by SAFIR and those obtained with SYSAF and ANSYS (present work) are show in Figure 8. The results obtained with the SYSAF are closer to those

obtained with ANSYS. But the difference with the SAFIR considering the collapse temperature was about 2.5%, which characterizes the good performance of the SYSAP in this example.

4 Conclusions

This study had the aim of presenting the development of computer code for steel frame analysis in fire using a non-linear frame finite element based on positions. The formulation of the referred element is based on the nodes positions and generalized vectors, instead displacements and finite rotations. The resulting scheme is objective non-linear geometrically exact, what means that the formulation does not present any stress field distortion when rigid motions are applied. Moreover, the simulations with this element consider the combined effect of all normal and shear stresses for checking the resistance in a 3-D plasticity criterion. These features differentiate the formulation of the non-linear frame finite element used in the presented code of those found in the existing codes for analysis of steel structures in case of fire. The use 12 degrees of freedom per node and its inherently non-linear behavior, which is an advantage, the non-linear frame finite element used has the disadvantage of a higher computational cost when compared with the conventional formulations, based on displacements and rotations. However, it is an appropriate price for the use of an exact formulation without approximations regarding the consideration of geometric nonlinearity and three-dimensional stress state. The obtained results indicate that the developed code can successfully simulate the behavior of steel framed structures in fire.