

# APLICAÇÃO DE ELEMENTO FINITO DE PÓRTICO NÃO LINEAR EM ANÁLISES INELÁSTICAS DE ESTRUTURAS DE AÇO À TEMPERATURA AMBIENTE E EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Ronaldo Rigobello<sup>1</sup>, Jorge Munaiar Neto<sup>2</sup> & Humberto Breves Coda<sup>3</sup>

## Resumo

*O presente trabalho apresenta a aplicação de elemento finito de pórtico não linear 3-D de formulação posicional, em análises inelásticas de estruturas de aço à temperatura ambiente e em situação de incêndio. A formulação posicional utiliza como graus de liberdade as posições dos nós dos elementos finitos, resultando em descrição intrinsecamente não linear do comportamento geométrico das estruturas. O elemento finito em questão permite considerar seções transversais quaisquer e representação geral tridimensional com base em vetores generalizados não restritos. Adota-se uma lei constitutiva tridimensional completa e 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. Os resultados dos exemplos apresentados, quando comparados aos encontrados na literatura, permitem verificar a precisão do código computacional utilizado e da formulação do elemento finito de pórtico não linear quando aplicado à análise inelástica de estruturas de aço à temperatura ambiente e em situação de incêndio.*

*Palavras-chave: Estruturas de aço. Análises numéricas. Análises inelásticas. Incêndio. Análises termoestruturais.*

## APPLICATION OF A NONLINEAR FRAME FINITE ELEMENT IN INELASTIC ANALYSIS OF STEEL STRUCTURES AT ROOM TEMPERATURE AND IN FIRE SITUATION

### Abstract

*This paper presents the application of a 3-D nonlinear frame finite element based on positions in inelastic analysis of steel structures at room temperature and fire situation. The positional formulation uses the nodes positions of the finite elements as degrees of freedom and results in a natural non-linear description of the geometric behavior of the structures. The finite element's cross-sections can be of any geometry following a discretization written regarding the generalized vectors, resulting in a solid-like representation. A complete tridimensional constitutive law and Reissner kinematics is used and, therefore, the effect of combined normal and shear stresses is taken into account for the verification of plasticity criteria and definition of flow rule. The results of presented examples when compared to those found in literature allow verifying the precision of the developed computational code and the proposed nonlinear frame finite element formulation when applied to inelastic analysis of steel frames at room temperature and fire situation.*

*Keywords: Steel structures. Numerical analysis. Inelastic analysis. Fire. Thermo-structural analysis.*

<sup>1</sup> Professor Doutor da Coordenação de Engenharia Civil – Campus Campo Mourão – UTFPR, ronbello@gmail.com

<sup>2</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jmunaiar@sc.usp.br

<sup>3</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, hbcoda@sc.usp.br

# 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de procedimentos avançados de cálculo para o dimensionamento das estruturas e o rápido desenvolvimento da tecnologia dos microcomputadores impulsionaram, nas últimas três décadas, diversas pesquisas referentes a métodos de análises não lineares inelásticas de estruturas de aço. Análises não lineares inelásticas, isto é, análises inelásticas com o cálculo do equilíbrio estrutural na posição deslocada, permitem avaliar diretamente a capacidade resistente e o comportamento de estruturas de aço diante das ações a que devem ser submetidas. De acordo com KIM e LEE (2002) e com CHIOREAN e BARSAN (2005), análises não lineares inelásticas podem ser divididas em duas categorias quanto à consideração da plasticidade nos elementos: *análises com plasticidade concentrada e análises com plasticidade distribuída (ou zonas plásticas)*.

As análises com *plasticidade concentrada* têm por base a teoria das rótulas plásticas (WHITE, 1993; CHEN et al., 1996; CHAN e ZHOU, 2004; NGO-HUU et al., 2007). Nesse tipo de análise a plastificação do material é considerada concentrada em rótulas plásticas sem dimensão. Regiões do elemento estrutural fora das rótulas plásticas são assumidas com comportamento elástico. As análises com *plasticidade distribuída* utilizam modelos bem mais refinados e, portanto, de acordo com KIM e LEE (2002), são mais precisas. Estas análises normalmente utilizam elementos finitos de pórtico ou elementos finitos do tipo casca. Em análises com elementos finitos de pórtico o elemento estrutural é discretizado em segmentos, e a seção transversal de cada segmento é subdividida em um número adequado de elementos planos (VOGEL, 1985; ZIEMIAN, 1993; JIANG et al., 2002; ALVARENGA e SILVEIRA, 2009).

Em NGO-HUU et al. (2007) menciona-se que apesar de as soluções obtidas com emprego de plasticidade distribuída serem consideradas relativamente mais precisas, estas têm como característica serem reconhecidas pela grande demanda de esforço computacional e usualmente aplicáveis apenas para fins de pesquisa. Porém, os crescentes avanços na capacidade de processamento dos computadores com custos acessíveis, além da possibilidade da paralelização dos códigos de cálculo, vêm cada vez mais tornando viável a aplicação deste tipo de formulação em casos práticos.

Com relação às análises de estruturas de aço em situação de incêndio, códigos computacionais com modelos de plasticidade distribuída têm sido tradicionalmente utilizados. Uma revisão dos principais códigos desenvolvidos baseados em plasticidade distribuída 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” podem ser citados o ANSYS, o ABAQUS e o DIANA. Dentre os códigos “especialistas” para análises de estruturas em situação de incêndio podem ser citados o SAFIR (FRANSSEN, 2005, 2007) o VULCAN (HUANG et al. 2004, YU et al. 2010), e o ADAPTIC (IZZUDDIN e ELNASHAI, 1989; SONG et al., 2000; 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 para análise de estruturas e situação de incêndio como, por exemplo, MA e LIEW (2004), LANDESMANN et al. (2005), SOUZA JUNIOR e CREUS (2007), dentre outros.

Dentro do contexto dos códigos computacionais com modelo de plasticidade distribuída, no presente trabalho são apresentados os passos básicos da formulação e algumas análises realizadas com código computacional desenvolvido denominado SYSAF. Este código é projetado para análises de estruturas de aço à temperatura ambiente e em situação de incêndio. O código é dividido em dois módulos principais, o primeiro para análises térmicas (CAT) das seções transversais e o segundo módulo para análises estruturais (CAE). O comportamento estrutural é simulado com o CAE do SYSAF por meio de elementos finitos de pórtico não linear de formulação posicional, conforme apresentado em CODA e PACCOLA (2010). A formulação posicional 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.

Para fins de análise termoestrutural com o SYSAF, podem ser realizadas análises numéricas de caráter térmico transiente 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 avaliação do desempenho da estrutura, durante o tempo decorrido do incêndio, até que se verifique o colapso.

Análises de casos presentes na literatura são utilizadas para validar os resultados obtidos com o código computacional em questão. Tais resultados permitem comprovar a eficácia do código desenvolvido e da formulação do elemento finito de pórtico não linear quando aplicado em análises de estruturas de aço à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

## 2 ASPECTOS GERAIS E FORMULAÇÃO

### 2.1 Análise Mecânica

O comportamento estrutural é simulado por meio do emprego de elemento finito de pórtico não linear de formulação posicional, em concordância com os procedimentos apresentado em CODA e 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 a formulações corrotacionais, e representam uma extensão de natureza necessariamente incremental da teoria linear para representar grandes rotações.

A estratégia adotada no desenvolvimento do referido elemento finito consiste na descrição do sólido 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, ao contrário das formulações clássicas. Dessa maneira, as mudanças de forma da seção transversal do elemento não são necessariamente normais à linha de referência assumida.

Na Figura 1 se faz a esquematização do mapeamento para um elemento de pórtico. É um mapeamento típico de 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.

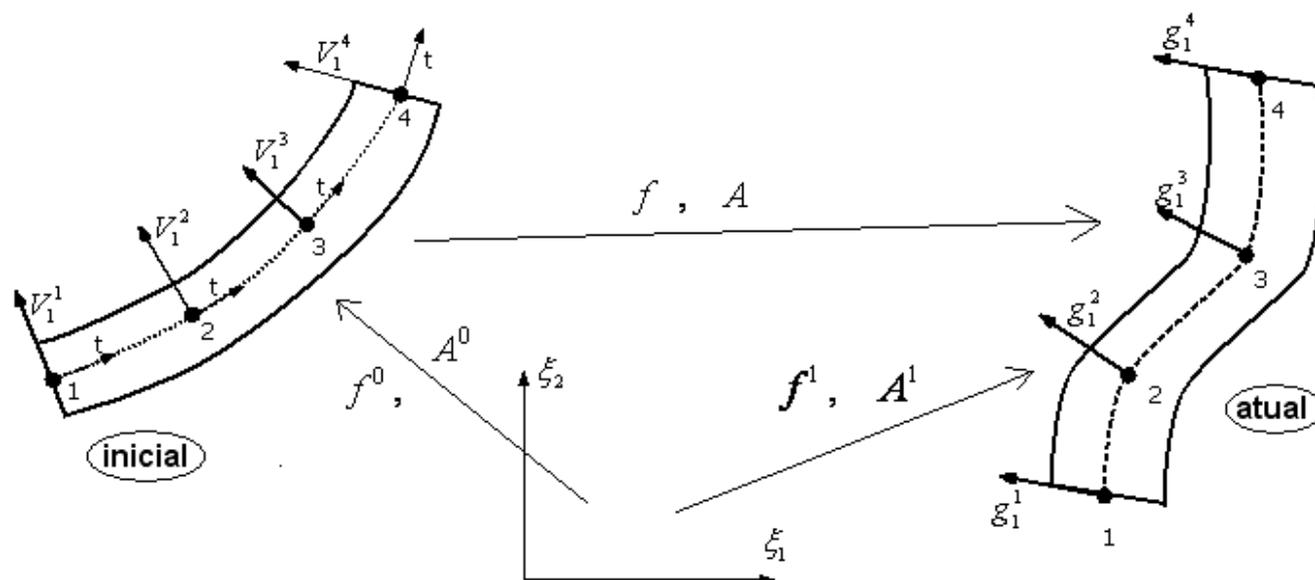


Figura 1 – Mapeamento das configurações inicial e atual do elemento, com relação ao espaço adimensional ( $\xi_1$  e  $\xi_2$ ).

Na figura 1, os parâmetros  $f$  e  $A$  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).

São considerados, na hipótese cinemática básica do elemento de pórtico, modos de empenamento e deformação com variação linear 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 ( $Y_{ii}^m$ ), seis componentes vetoriais ( $g_{i\ell}^1$  e  $g_{i\ell}^2$ ), dois valores de intensidade da taxa de deformação nas direções transversais ( $\Lambda_\ell^1$  e  $\Lambda_\ell^2$ ) e intensidade do empenamento ( $W_\ell$ ). Maiores detalhes sobre a formulação do referido elemento podem ser vistos em CODA e PACCOLA (2010) e, alternativamente, 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 2. Nessa mesma Figura 2 se destaca que, apenas na configuração inicial do corpo analisado, os vetores generalizados são unitários e ortogonais à linha de referência, ressaltando que para a configuração atual, o mesmo aspecto pode não se verificar, fato que consiste na principal característica do mapeamento com vetores não restritos.

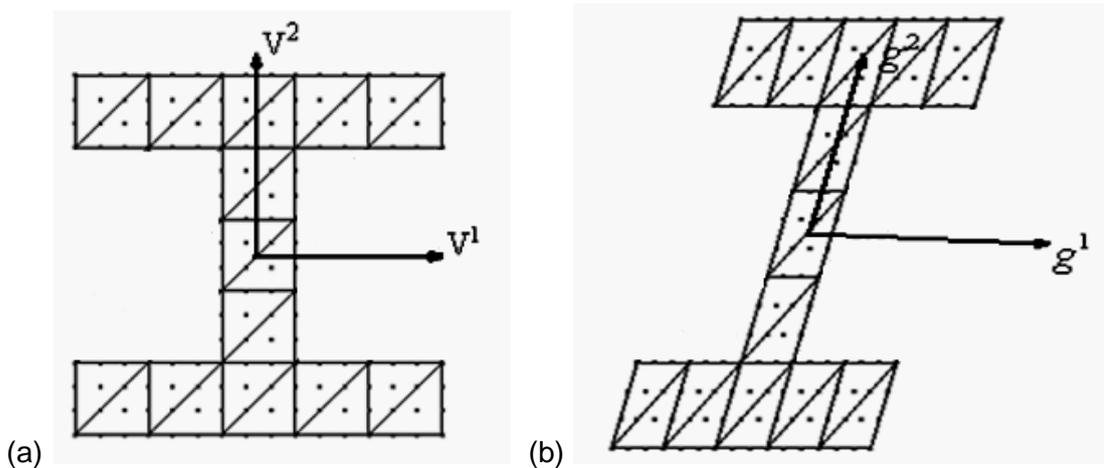


Figura 2 – Definição geral da geometria de uma seção transversal: (a) Configuração Inicial e (b) Configuração atual.

### 2.1.1 Técnica de Solução do problema mecânico não linear

A técnica de solução do problema mecânico não linear geométrico tem por base o princípio da mínima energia potencial total. A energia potencial total ( $\Pi$ ) é descrita pela Eq. (1), em que  $F$  é o vetor de forças externas conservativas aplicadas,  $Y$  é o vetor posição (incluindo todos os graus de liberdade) e  $\phi$  é o potencial de energia livre de Helmholtz, que inclui a energia de deformação e a restituição da dissipação plástica, ambas dependentes da temperatura, Eq. (2). 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.

$$\Pi = \int_{V_0^{el}} \phi dV_0^{el} - F_{nodj} Y_{nodj} \quad (1)$$

$$\phi = \phi(\mathbf{E}_e, \mathbf{E}_p, \alpha(T), \sigma_0(T), \mathbf{C}(T), \mathbf{H}(T)) \quad (2)$$

Na Eq. (2),  $\mathbf{E}_e$  e  $\mathbf{E}_p$  representam 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,  $\sigma_o(T)$  é a tensão limite de proporcionalidade 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. Maiores detalhes sobre esse procedimento aplicado a solução do presente problema pode ser vista em CODA (2008) e, alternativamente, em RIGOBELLO (2011).

### 2.1.2 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 “*isotrópico*”. Maiores informações sobre a formulação do código quanto ao tratamento da plasticidade pode ser vista de maneira detalhada em BOTTA et al. (2008) e, de maneira sucinta, em RIGOBELLO (2011).

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 de seções transversais de parede fina nas simulações com o elemento finito de pórtico utilizado e que, para tal fim, enriquecimentos adicionais de graus de liberdade devem ser implementados.

## 2.2 Análise Térmica

As análises térmicas com o SYSAF têm por base a clássica Eq. (3) denominada equação diferencial da difusão (ou condução) de calor em sólidos. Na eq. (4)  $c$  é o calor específico,  $\rho$  é massa específica e  $\lambda$  a condutividade térmica. A variável  $q$  se refere a uma geração de calor interno 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  $\Omega$  de interesse em elementos finitos e aplicando o método dos resíduos ponderados com a consideração adequada das condições de contorno, se obtém a Eq. (4) que descreve, de forma matricial, o equilíbrio dos fluxos de calor do domínio considerado em um dado instante.

$$\rho c \frac{dT}{dt} - \lambda \nabla^2 T - q = 0 \quad (3)$$

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (4)$$

Na Eq. (4),  $[C]$  é a matriz de capacidade calorífica,  $[K]$  a matriz de rigidez térmica e  $\{F\}$  o vetor de fluxo de calor nodal. As matrizes  $[C]$ ,  $[K]$  e o vetor  $\{F\}$  são conhecidos, enquanto  $\{T\}$  é o vetor dos parâmetros desconhecidos (no caso, as temperaturas que se deseja determinar). Para solução da Eq. (4) faz-se 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 e USMANI (1994) e LEWIS et al. (2004) e que pode ser vista com maiores detalhes em RIGOBELLO (2001).

Para fins de análise termoestrutural, a seção transversal é discretizada com elementos triangulares cúbicos de 10 nós (TT10), com condições de contorno de convecção e radiação aplicadas à seção transversal por meio de elementos lineares do tipo TS2 no contorno. A Figura 3 ilustra os elementos finitos mencionados, bem como um exemplo de discretização da seção transversal dos elementos estruturais.

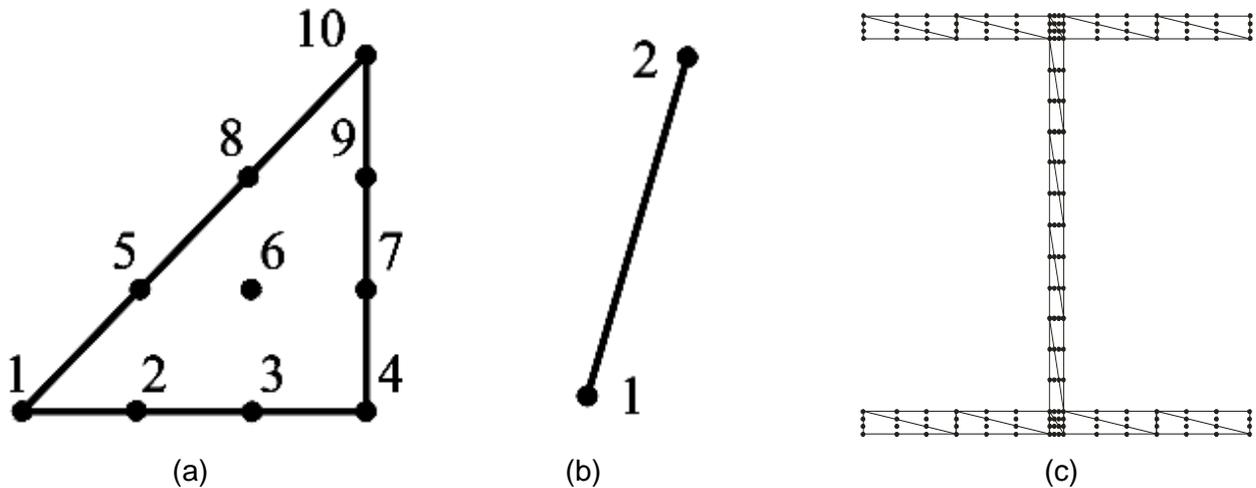


Figura 3 – a) Elemento finito TT10; (b) Elemento finito TS2; (c) Exemplo de discretização da seção transversal.

### 2.3 Processo de desenvolvimento da análise em situação de incêndio

Uma análise em situação de incêndio consiste basicamente em uma análise termoestrutural do comportamento de uma dada estrutura durante a ocorrência de um incêndio, em que são considerados os efeitos da ação térmica provenientes dessa situação. A estratégia adotada para esse tipo de análise com o SYSAF pode ser dividida em três fases.

A primeira fase do processo consiste numa análise mecânica 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 pelo incêndio, para cada instante estabelecido. Nessa fase, as análises podem ser realizadas por meio do código CAT, pertencente ao código principal SYSAF, considerando a variação das propriedades térmicas dos materiais em função do aumento da temperatura.

A partir dos resultados da 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 considerados na terceira fase, a análise termoestrutural, estabelecendo-se assim uma conexão entre as análises térmica e estrutural. Assim, na análise termoestrutural utiliza-se o código 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.

Como as análises por meio do código SYSAF tratam apenas da simulação de estruturas apertadas em situação de incêndio por meio de elementos finitos de pórtico, a análise térmica é realizada em caráter bidimensional, com intuito de determinar a variação do campo de temperaturas na seção transversal de cada elemento considerado. Portanto, aqui não se considera a variação do campo de temperaturas ao longo dos elementos finitos, ressaltando-se, no entanto, que elementos finitos diferentes podem apresentar distribuição de temperatura diversa.

### 3 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

#### 3.1 Pilar com tensão residual

Em CHEN et al. (1996) são apresentados resultados referentes à análise de um pilar, no contexto de plasticidade distribuída, submetido à compressão e momentos iguais em ambas as extremidades, com imperfeição inicial, conforme ilustrado pela Figura 4a. Além disso, foi assumido para o elemento o padrão de tensão residual proposto por GALAMBOS e KETTER (1957), ilustrado na Figura 4b.

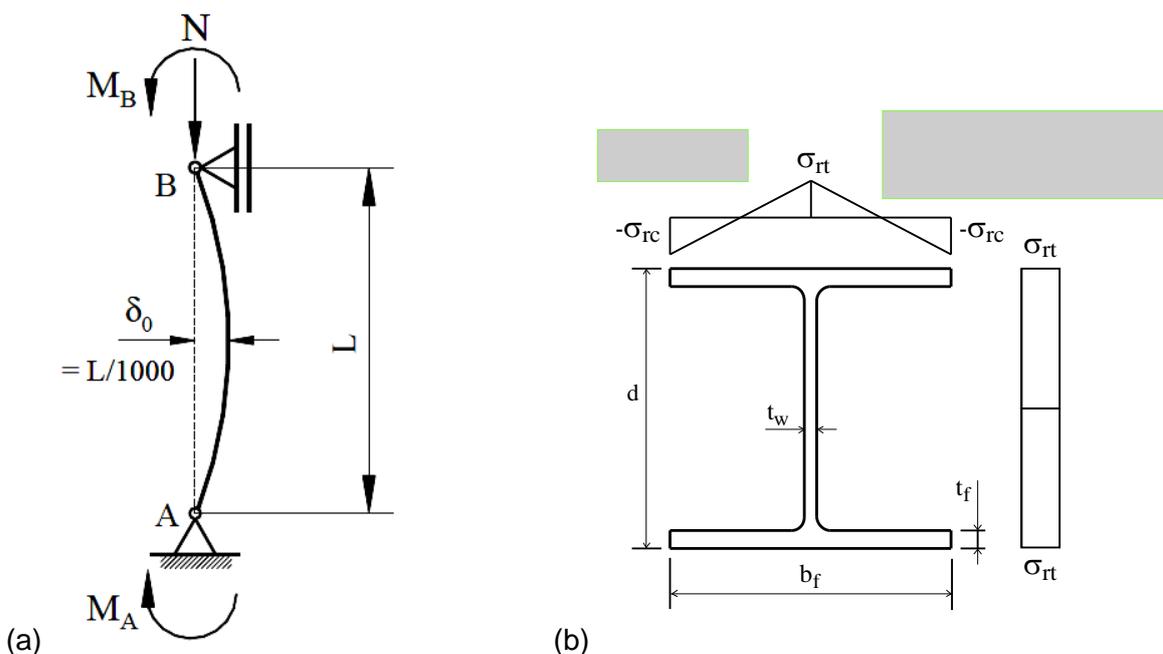


Figura 4 – a) Geometria do problema, ilustração extraída de ALVARENGA e SILVEIRA (2009) e b) Distribuição de tensões residuais, segundo GALAMBOS e KETTER (1957).

A análise foi conduzida empregando-se um perfil de aço com seção W8x31 (padrão americano) com índices de esbeltez iguais a 20, 60 e 100, considerando-se apenas a flexão em torno do eixo de maior inércia, de modo que a instabilidade em torno do eixo menor inércia foi restringida. Além disso, os elementos da seção transversal são plenamente compactos para evitar a ocorrência de instabilidade local, não capturada com as ferramentas numéricas utilizadas. A imperfeição inicial do pilar têm variação senoidal ao longo do comprimento e amplitude máxima ( $\delta_0$ ) igual a  $L/1000$  no meio do vão. O módulo de elasticidade foi tomado igual a 200.000 MPa e a resistência ao escoamento ( $f_y$ ) foi assumida igual a 250 MPa, conforme CHEN et al. (1996).

Inicialmente estudou-se a resposta do modelo desprovido de tensão residual, cuja resposta obtida com o código SYSAF foi comparada com os resultados por meio do código ANSYS. As análises com o ANSYS foram efetuadas com a discretização do pilar em 6 elementos quadráticos do tipo BEAM189 segundo o eixo do pilar. A discretização do modelo com o SYSAF emprega dois elementos cúbicos ao longo do comprimento do pilar e seção transversal discretizada de acordo com o padrão apresentado na Figura 3c.

Na Figura 5 podem ser vistos os resultados das curvas de interação para análise sem a consideração de tensão residual, obtidos com o ANSYS e com o SYSAF, para as relações de esbeltez  $L/r$  iguais a 20, 60 e 100. Como pode ser constatado, por meio da análise da Figura 5, as curvas obtidas com o ANSYS e com o SYSAF resultaram praticamente idênticas.

Na Figura 6 são apresentados os resultados das curvas de interação para análise com a consideração de tensão residual obtidos com o SYSAF, bem como aqueles apresentados em CHEN et al. (1996). Verifica-se que os resultados obtidos com o SYSAF são bastante próximos daqueles obtidos em CHEN et al. (1996) na análise do problema em questão.

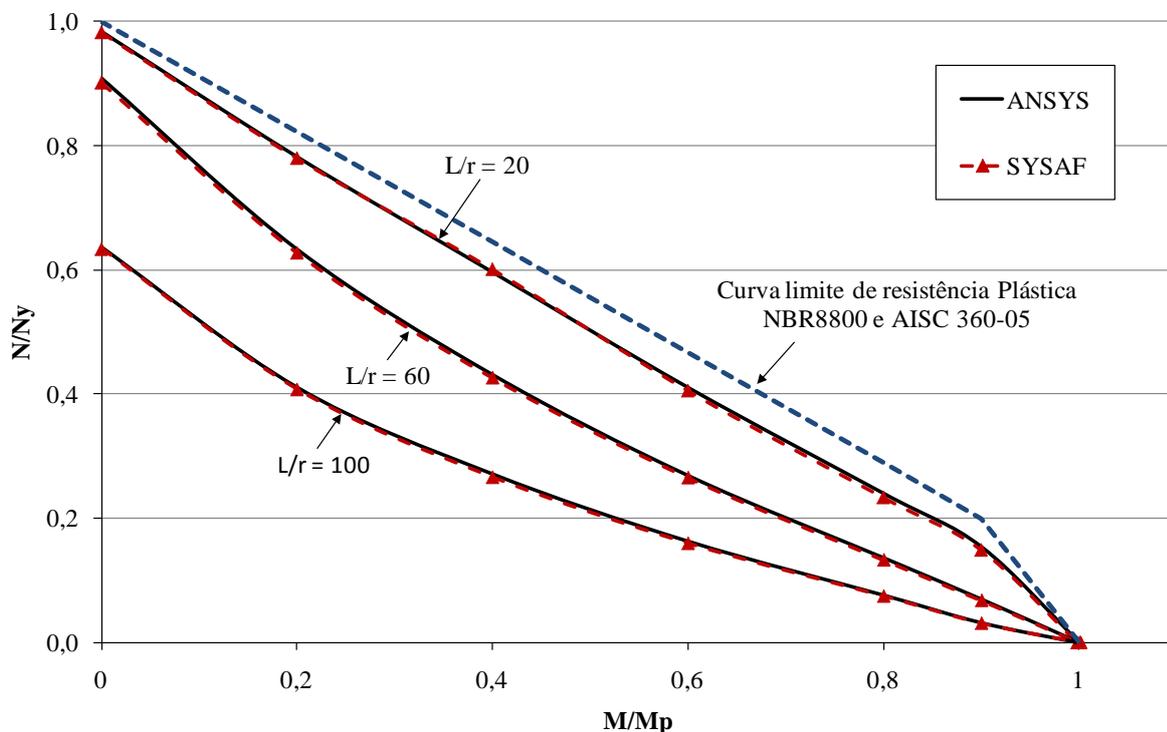


Figura 5 – Curvas de interação para análise sem consideração de tensão residual.

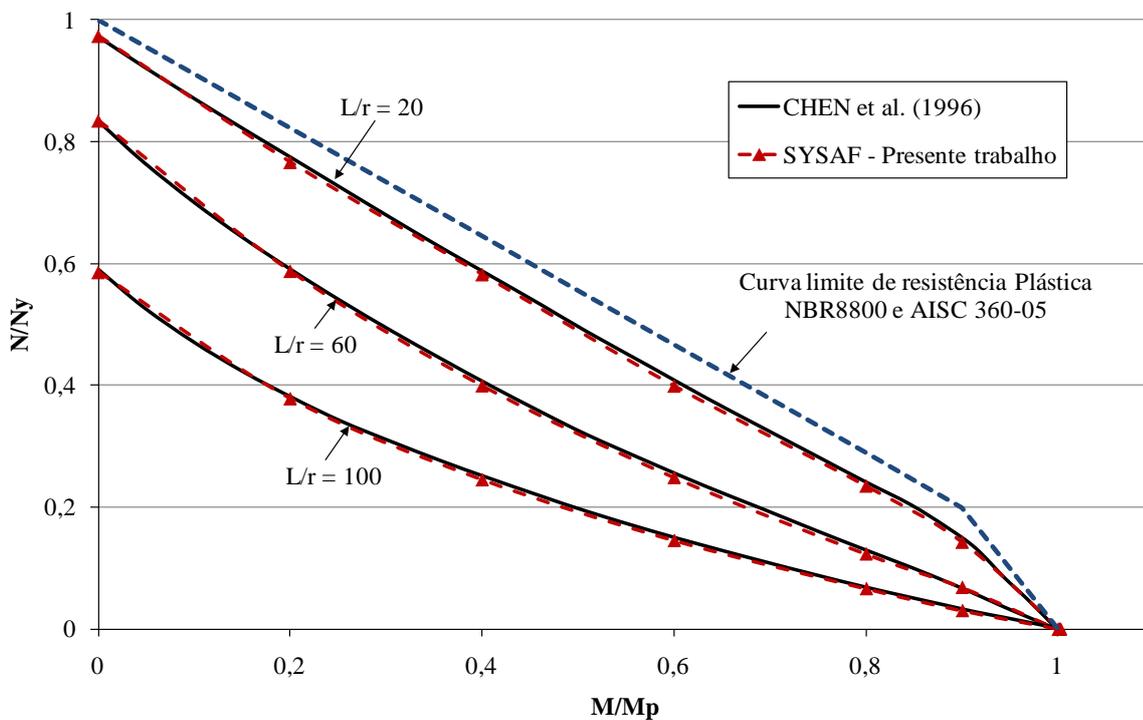


Figura 6 – Curvas de interação para a análise com consideração de tensão residual.

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

Na Figura 7 apresenta-se a geometria do pórtico tridimensional de aço de dois andares, analisado originalmente em NGO-HUU et al. (2007). As seções das vigas e dos pilares consistem de perfis H150 x 160 x 6.5 x 10 ( $d = 150$  mm,  $b_f = 160$  mm,  $t_w = 6,5$  mm e  $t_f = 10$  mm). A resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade são 320 MPa e 221.000 MPa, respectivamente. O material é assumido com comportamento elasto-plástico perfeito. O padrão de tensão residual utilizado foi o mesmo recomendado pela ECCS (1984) e ilustrado por meio da Figura 7b. São consideradas apenas imperfeições globais referentes ao desaprumo em cada nível de pavimento.

Os valores considerados, extraídos de NGO-HUU et al. (2007) são listados na tabela 1. Em NGO-HUU et al. (2007) analisa-se o problema em questão por meio de modelo com elementos de pórtico e plasticidade concentrada (rótulas plásticas), com a consideração da plastificação gradual da seção transversal por meio da discretização da seção transversal em elementos planos. Com vistas à geração de resultados para comparação, no referido trabalho, o pórtico em questão também foi modelado com 49840 elementos tipo casca S4R5 empregando-se o código ABAQUS.

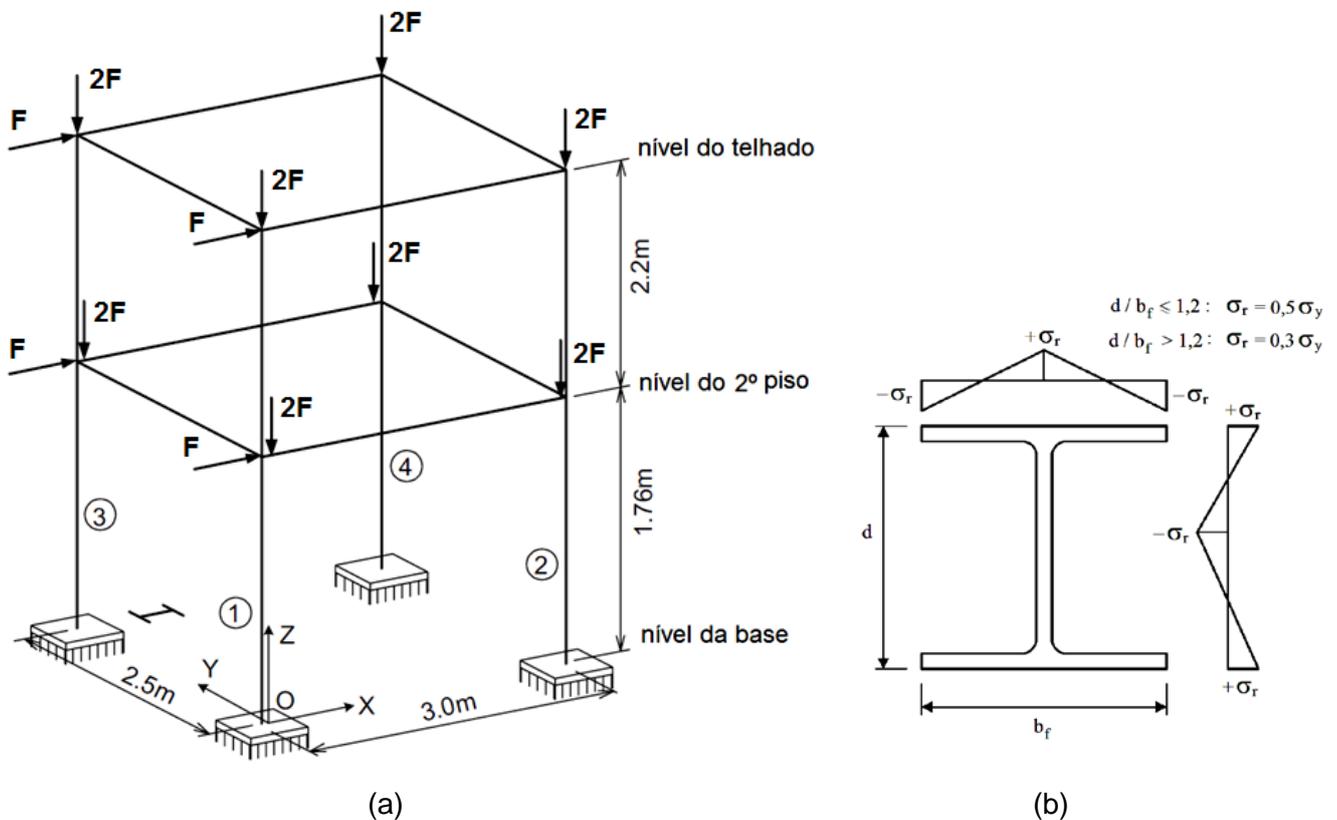


Figura 7 – (a) Pórtico tridimensional de aço com seções tipo H. Fonte: NGO-HUU et al. (2007). (b) Padrão de tensões residuais para perfis laminados segundo ECCS (1984).

Tabela 1 – Pórtico tridimensional de aço com seções tipo H. Extraído de NGO-HUU et al. (2007)

Nível	Desaprumo (mm)							
	Pilar 1		Pilar 2		Pilar 3		Pilar 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Telhado	4,51	11,08	5,49	11,41	-8,17	6,58	-4,31	12,04
Segundo Piso	1,39	6,88	-0,68	6,77	-5,11	2,11	-3,96	6,19
Base	0	0	0	0	0	0	0	0

Na análise com o código SYSAF são utilizados quatro (4) elementos finitos cúbicos por elemento estrutural, bem como seção transversal discretizada de acordo com o padrão da Figura 3c. Na Figura 8 são apresentadas curvas deslocamento *versus* força aplicada, considerando o nível do segundo piso e do telhado, Figuras 8a e 8b, respectivamente.

Por meio da análise da Figura 8 pode-se notar que os resultados obtidos com o SYSAF são muito próximos o àqueles apresentados em NGO-HUU et al. (2007) obtidos por meio do método das rótulas plásticas. Em NGO-HUU et al. (2007) atribui-se as diferenças obtidas em relação ao modelo com elementos do tipo cascas ao fato de se utilizar apenas um elemento de pórtico na análise com plasticidade concentrada, concluindo que um único elemento finito não é suficiente para capturar o comportamento não linear de maneira tão precisa.

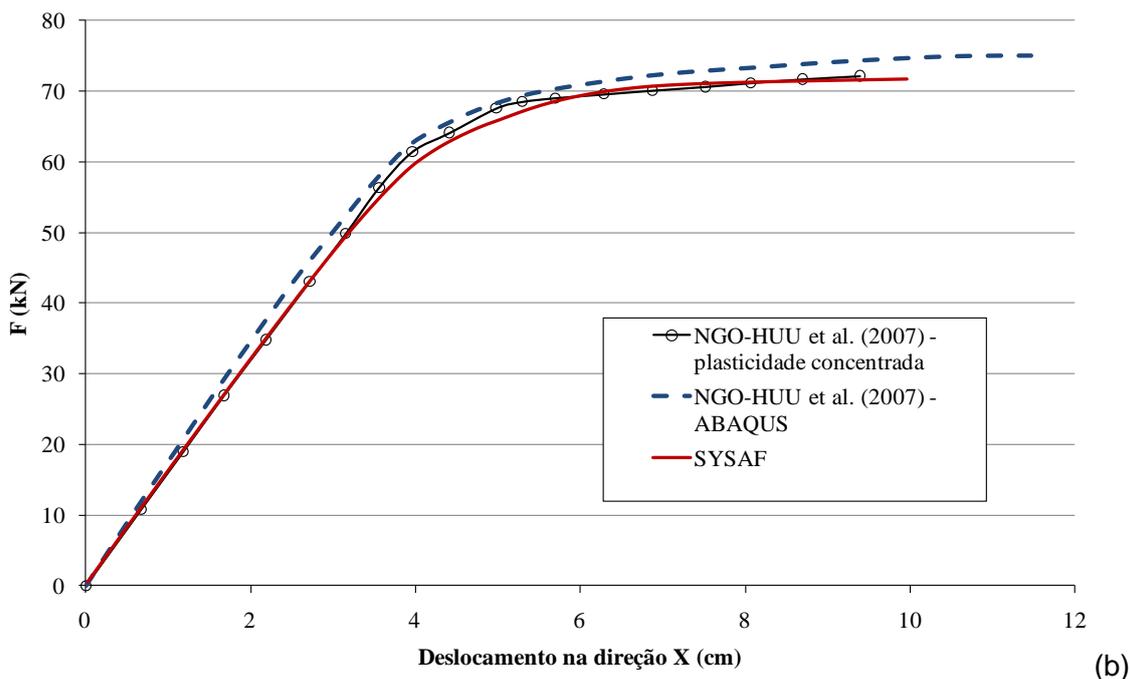
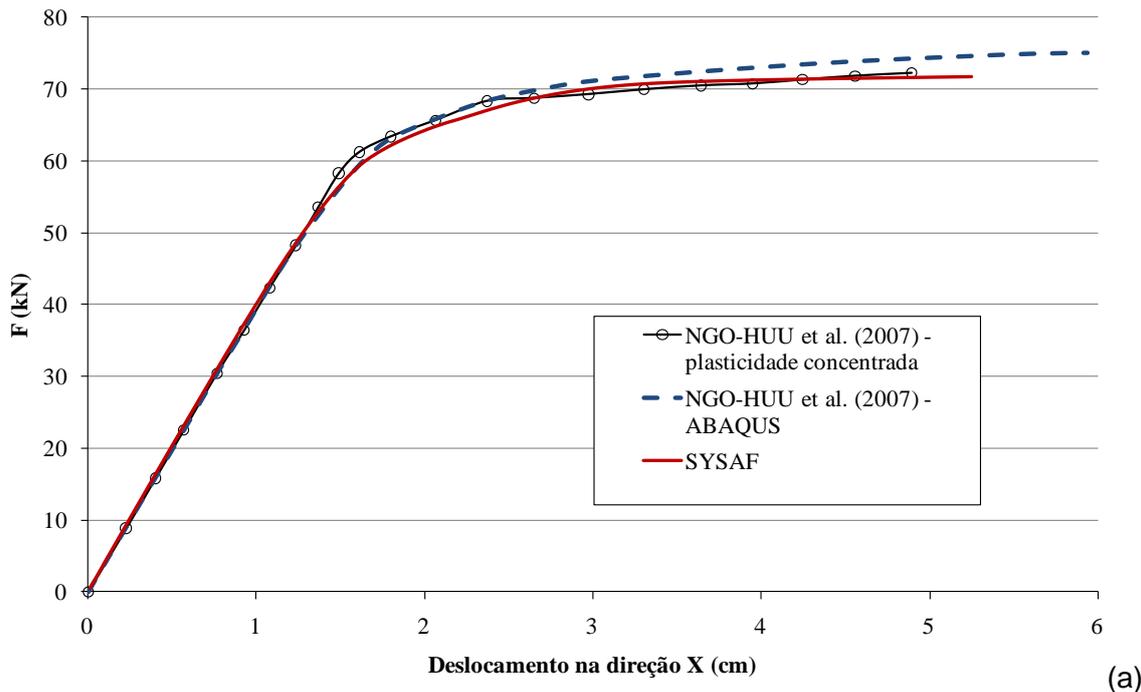


Figura 8 – Curvas deslocamento x força aplicada: (a) nível do segundo andar e (b) nível do telhado.

Deve-se mencionar ainda que a diferença das formulações dos elementos finitos e a discretização explícita considerada nas regiões de conexão, por meio de elementos finitos tipo casca, pode também ter influenciado nas diferenças dos resultados obtidos em relação àqueles obtidos com elementos finitos de pórtico.

### 3.3 Pilares de aço em situação de incêndio

Este exemplo foi apresentado em LANDESMANN et al. (2005) e consiste da simulação do comportamento estrutural de pilares biapoiados, cujos perfis são do tipo IPE-360, com 4 m de comprimento e expostos ao modelo de incêndio-padrão de acordo com a ISO 834-1:1999.

Os dois modelos analisados são ilustrados por meio da Figura 9, na qual são também apresentados os carregamentos a que os pilares são submetidos, bem como as condições de exposição ao modelo de incêndio-padrão. A combinação de carregamentos (N e M) consiste de uma parcela da capacidade resistente do pilar à temperatura ambiente  $N_{y20}$  (resistência à compressão) e  $M_{p20}$  (resistência a flexão).

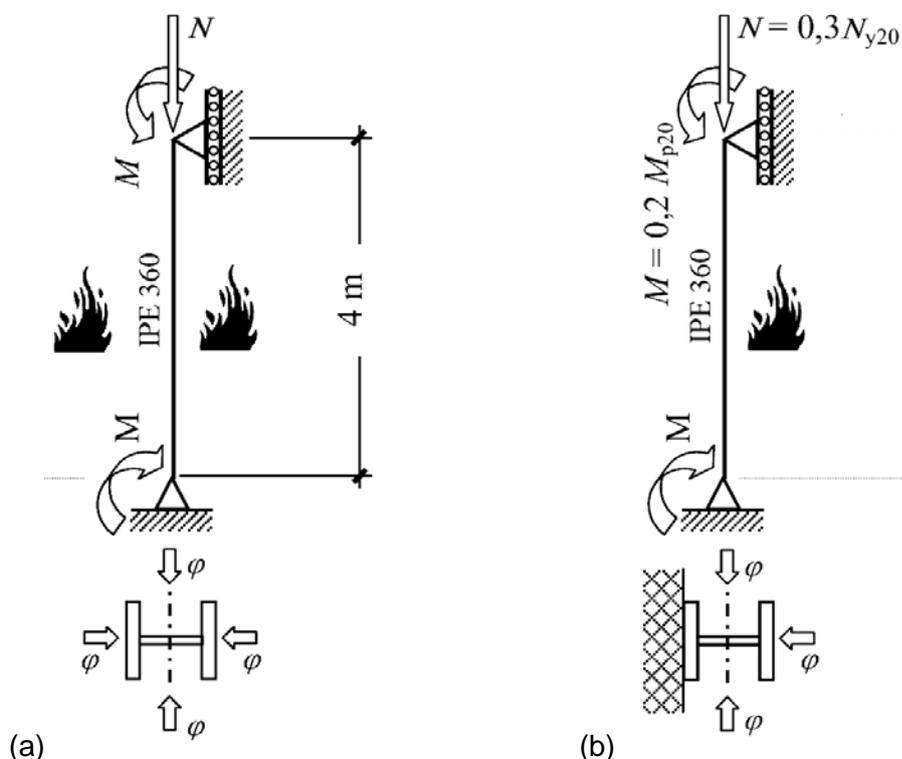


Figura 9 – Modelos de viga-pilar biapoiados expostos ao incêndio considerando: (a) seção com as quatro faces expostas e (b) seção com três faces expostas. Fonte: LANDESMANN (2005).

Para fins de simulação numérica, em um primeiro cenário o pilar é considerado aquecido pelos quatro lados do perfil (Figura 9a). Num segundo cenário o pilar é considerado aquecido por apenas três lados da seção (Figura 9b). De acordo com LANDESMANN et al. (2005) esta situação representa um pilar de fachada onde umas das mesas do perfil é protegida parcialmente da ação do fogo.

A título de ilustração, a malha de elementos finitos da seção transversal e os campos de temperaturas obtidos com o SYSAF para os modelos de pilar da Figura 9, considerando um tempo de exposição ao modelo de incêndio-padrão ISO-834 igual a 500 s, podem ser vistos na Figura 10. O módulo de elasticidade do material E possui valor igual a 205000 MPa e a resistência ao escoamento

$f_y$  é igual a 250 MPa. Considera-se o alongamento relativo e relação constitutiva segundo o modelo do CEN EN 1993-1-2:2005.

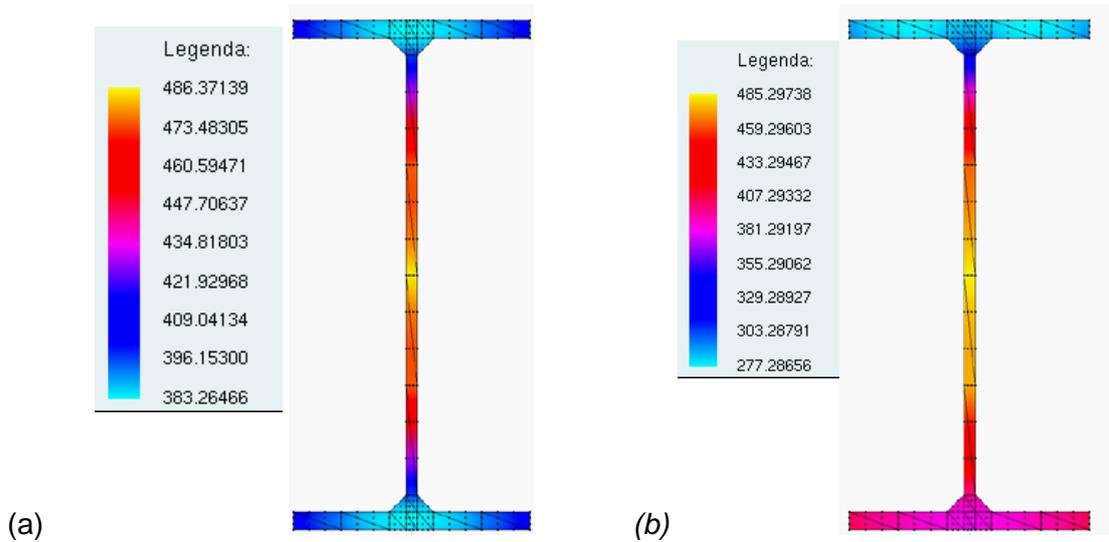


Figura 10 – Campo de temperaturas para um tempo de exposição igual a 500 s obtido com o SYSAF: a) seção com as quatro faces expostas; b) seção com três faces expostas.

Os resultados obtidos com os códigos computacionais SAFIR, SAAFE (LANDESMANN et al., 2005) e SYSAF para os modelos aquecidos por três e quatro faces são apresentados na Figura 11. 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 11 pode-se observar a proximidade dos resultados obtidos com os códigos SYSAF e SAFIR, como esperado, distanciando-se um pouco daqueles obtidos com o código SAAFE, que tem por base o conceito de rótulas plásticas. Tais resultados demonstram a potencialidade do SYSAF na análise de elementos submetidos à flexão composta em temperaturas elevadas.

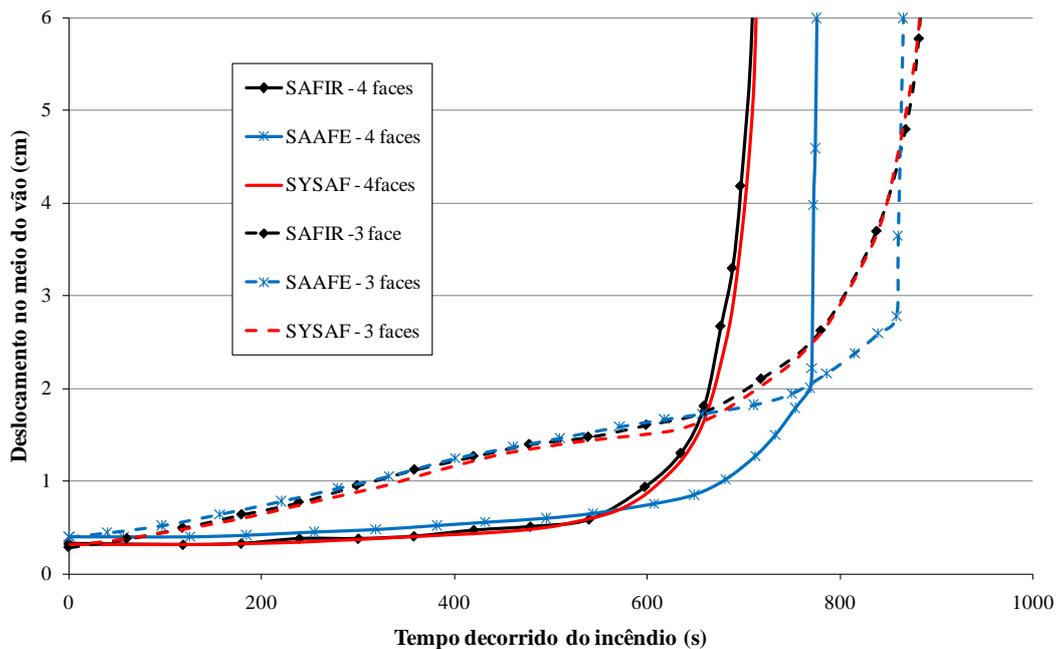


Figura 11 – Deslocamento no meio do vão para os pilares esquematizados na Figura 9, expostos ao modelo de incêndio padrão.

### 3.4 Ensaios de pórticos de aço submetidos à temperaturas elevadas

Em RUBERT e SCHAUMANN (1985, 1986) são apresentados resultados referentes a uma série de ensaios de pórticos de aço submetidos à temperaturas elevadas. Neste exemplo, duas configurações de pórtico, denominadas EGR e ZSR, ilustradas na Figura 12, foram consideradas. Todos os perfis de aço dos pórticos consistem de seções do tipo IPE 80.

Os pórticos foram carregados e depois aquecidos a uma taxa constante até o colapso por meio de dispositivos elétricos. Todos os elementos da configuração EGR foram aquecidos uniformemente, enquanto que no caso da série ZSR apenas o compartimento esquerdo foi totalmente aquecido, com os demais elementos mantidos à temperatura ambiente. Os principais parâmetros, de acordo com a Figura 12, são dados na tabela 2, na qual aparece o termo  $f_{y,0}$  que se refere à resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

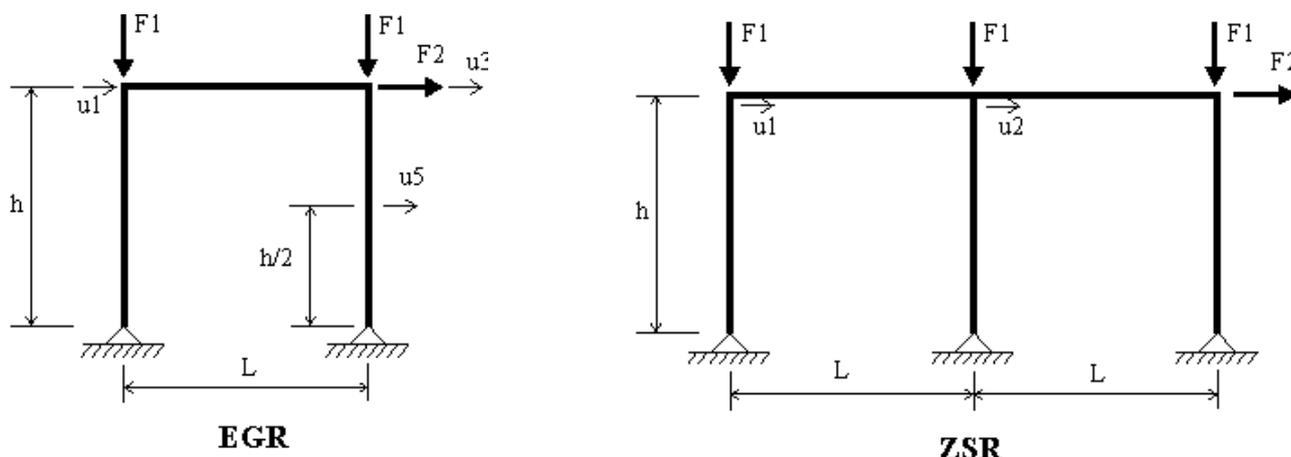


Figura 12 – Esquemas estáticos dos pórticos analisados.

Tabela 2 – Parâmetros considerados para os pórticos analisados

Configuração	L (cm)	h (cm)	$f_{y,0}$	F1 (kN)	F2 (kN)
EGR1	122	117	38,2	65	2,5
ZSR1	120	118	35,5	<b>74</b>	2,85

Estes pórticos foram analisados numericamente em RUBERT e SCHAUMANN (1986), em IZZUDDIN et al. (2000), em SOUZA JUNIOR e CREUS (2007), entre outros. Para fins de comparação, os resultados obtidos com o código SYSAF serão comparados com os resultados experimentais apresentados em RUBERT e SCHAUMANN (1985), para os pórticos denominados EGR1 e ZSR1, bem como os resultados numéricos apresentados em IZZUDDIN et al. (2000), obtidos com o código ADAPTIC.

O módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente é tomado igual a 210 GPa, enquanto que para o coeficiente de dilatação térmica adota-se um valor constante igual a  $14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Os diagramas tensão-deformação foram obtidos com base no modelo do CEN EN 1993-1-2:2005, no entanto, se utilizam os fatores de redução propostos em RUBERT e SCHAUMANN (1986), da mesma forma como feito em IZZUDDIN et al. (2000) e também adotado em SOUZA JUNIOR e CREUS (2007).

Com relação à discretização dos modelos para as análises com o SYSAF, foram empregados 4 elementos finitos cúbicos por elemento estrutural, com a seção transversal discretizada de maneira semelhante àquela apresentada na Figura 3c.

Em RUBERT e SCHAUMANN (1985) e em IZZUDIN et al. (2000) apresenta-se a variação dos deslocamentos em função da temperatura para os sistemas do exemplo em questão, no caso, EGR1 e ZSR1. Estes resultados são apresentados nas Figuras 13 e 14, os quais são comparados com as previsões do ADAPTIC e do SYSAF. Por meio da análise das Figuras 13 e 14, pode-se notar que, em geral, o código SYSAF fornece satisfatoriamente os deslocamentos dos sistemas analisados, e com resposta bastante próxima do código especialista ADAPTIC (IZZUDDIN et al., 2000).

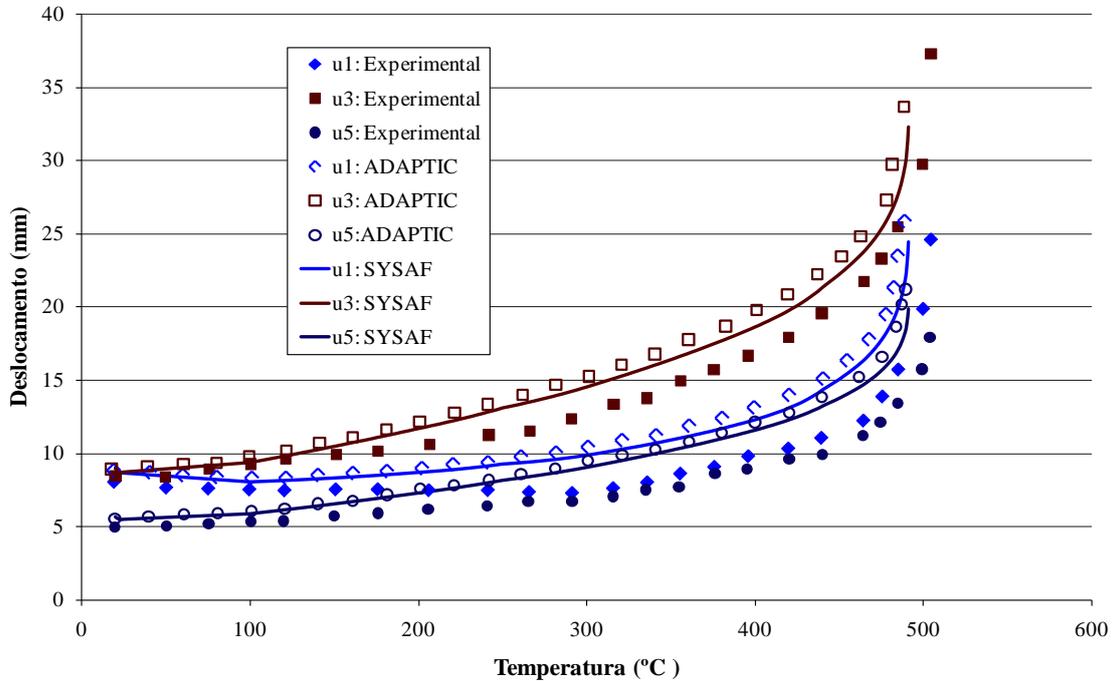


Figura 13 – Comparação com resultados experimentais: configuração EGR1.

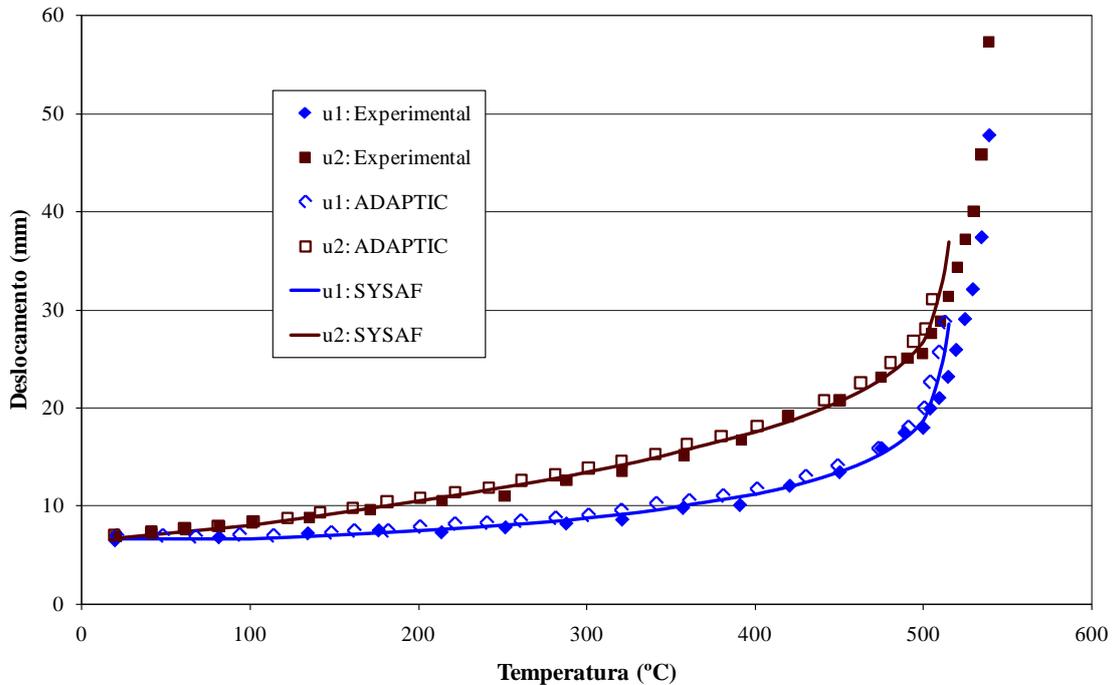


Figura 14 – Comparação com resultados experimentais: configuração ZSR1.

As temperaturas críticas (ou de colapso) obtidas por meio do SYSAF (presente trabalho), e aquelas obtidas com o ADAPTIC (IZZUDDIN et al., 2000), bem como aquelas referentes aos resultados experimentais (RUBERT e SCHAUMANN, 1985, 1986), podem ser vistas na tabela 3.

Tabela 3 – Temperaturas críticas obtidas (°C)

Configuração	Experimental	ADAPTIC	dif (%)	SYSAF	dif (%)
EGR1	515	489	-5,0	491	-4,7
ZSR1	547	514	-6,0	515	-5,9

Pode se notar por meio de análise com relação à tabela 3 que os resultados de temperatura crítica obtidos com o SYSAF foram satisfatórios e bastante próximos dos resultados obtidos com o ADAPTIC, ambos fornecendo temperaturas críticas um pouco abaixo daquelas obtidas experimentalmente, porém, com desvio máximo da ordem 6%.

## 4 CONCLUSÕES

Este apresentou análises de estruturas de aço à temperatura ambiente e em temperaturas elevadas com desenvolvimento de estratégia computacional que emprega elementos finitos de pórtico não linear 3-D, cuja formulação tem por base a solução do perfil de temperatura nas seções transversais e a modelagem e a posição dos nós dos elementos finitos, ao invés de deslocamentos. Tal formulação 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 aos principais códigos existentes para análise de estruturas de aço em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Por utilizar 12 graus de liberdade por nó e ser de natureza intrinsecamente não linear, aspecto este que representa aqui 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, se entende que tal desvantagem é um preço adequado a se considerar para a utilização de uma formulação exata, sem aproximações com relação à consideração da não linearidade geométrica. Além disso, vale destacar que com o avanço dos recursos computacionais e a utilização de processamento paralelo, o custo computacional se tornará cada vez menos significativo na escolha das estratégias para fins de processamento numérico.

Os resultados dos exemplos aqui apresentados, quando comparados com os resultados das referências utilizadas, comprovam a precisão do código computacional e da formulação posicional do elemento finito de pórtico não linear utilizados quando aplicado a análises inelásticas de estruturas de aço à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia São Carlos/USP e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte direcionado ao presente trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, A. R.; SILVEIRA, R. A. M. Second-order plastic-zone analysis of steel frames Part I: Numerical formulation and examples of validation. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 6, p. 323 – 342, 2009.

BOTTA, A. S.; PACCOLA, R. R.; VENTURINI, W. S.; CODA, H. B. A discussion on volume change in the plastic phase. **Communications in Numerical Methods in Engineering**, v. 24, n. 11, p. 1149–1162, 2008.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CHAN, S.L.; ZHOU, Z. H. Elastoplastic and large deflection analysis of steel frames by one element per member. II: Three hinges along member. **ASCE Journal of Structural Engineering**, v. 130, n. 4, p. 545– 553, 2004.

CHEN, W.F.; GOTO, Y.; LIEW, J. Y. R. Stability design of semi-rigid frames. John Wiley & Sons, 1996. 488 p.

CHIOREAN, C. G.; BARSAN, G. M. Large deflection distributed plasticity analysis of 3D steel frameworks. **Computers and Structures**, v. 83, p. 1555–1571, 2005.

CODA, H. B. (2008). An Enhanced Positional Finite Element Formulation for Geometrical Non-Linear Analysis of Three-Dimensional Laminate Frames. In: The Ninth International Conference on Computational Structures Technology, 2008, Atenas. **The Ninth International Conference on Computational Structures Technology**. Edinburgo: civil comp press.

CODA, H. B.; PACCOLA, R. R. Improved finite element for 3D laminate frame analysis including warping for any cross section. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, n. 4, p. 1107-1137, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1993-1-2: Eurocode 3 - Design of Steel Structures. Part 1-2: General rules – Structural Fire Design**. Brussels, 2005.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK – ECCS (1984). **Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints**. Technical Committee 8 – Structural Stability Technical Working Group 8.2. No 33. Brussels.

FRANSEN, J. -M. (2007). **User’s manual for safir 2007** - A computer program for analysis of structures Subjected to fire. Liege.

FRANSEN, J. -M. (2005). SAFIR - A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire. **Engineering Journal AISC**, 42(3):143–158.

GALAMBOS, T. V.; KETTER, R. L. (1957). **Further studies of columns under combined bending and thrust**. Bethlehem: Lehigh University, Fritz Engineering Laboratory (Report No. 205A.19).

- HUANG, Z.; BURGESS, I. W.; PLANK, R. J. (2004). 3D modeling of beam-columns with general cross-sections in fire. In: SIF 2004. Proc., 3rd Int. Workshop on Structures in Fire. In: SiF'04 - Structures in Fire. **Proceedings of the 3rd International Workshop**, NRC-CNRC, IRC, p. 323-334.
- HUANG, H. C.; USMANI, A. S. **Finite Element Analysis for Heat Transfer**. Springer-Verlag, 1994.
- IZZUDDIN, B. A.; SONG, L.; ELNASHAI, A. S.; DOWLING, P. J. 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, 2000.
- IZZUDDIN, B. A.; ELNASHAI, A. S. (1989). **ADAPTIC**: A Program for the Adaptive Dynamic Analysis of Space Frames. London: Imperial College, London (Tech Report No. ESEE-89/7).
- JIANG, X. M., CHEN H., LIEW J. Y. R. (2002). Spread-of-plasticity analysis of three-dimensional steel frames. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 58, n. 2, p. 193–212.
- KIM, S. -E.; LEE, D. H. Second-order distributed plasticity analysis of space steel frames. **Engineering Structures**, v. 24, n. 6, p. 735–744, 2002.
- 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.
- LEWIS, R.W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. John Wiley & Sons Ltd., 2004. 356 p.
- MA, K. Y.; LIEW, J. Y. R. Nonlinear Plastic Hinge Analysis of Three-Dimensional Steel Frames in Fire. **Journal of Structural Engineering**, v. 130, n. 7, p. 981-990, 2004.
- NGO-HUU, C.; KIM, S. -E.; OH, J. R. Nonlinear analysis of space steel Frames using fiber plastic hinge concept. **Engineering Structures**, v. 29, p. 649–657, 2007.
- RIGOBELLO, R. **Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço apertadas em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- RIGOBELLO, R.; MUNAIAR NETO, J.; CODA, H. B. Análises inelásticas de estruturas de aço com elemento finito de pórtico laminado não linear. In: XXXI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2010. **Mecânica Computacional**, v. XXIX, p. 7503-7527, 2010.
- RUBERT, A., SCHAUMANN, P. Structural steel and plane frame assemblies under fire action. **Fire Safety Journal**, n. 10, p. 173–184, 1986.
- RUBERT, A., SCHAUMANN, P. Tragverhalten Stahlerner Rahmensysteme bei Brandbeanspruchung. **Stahlbau**, n. 9, p. 280–287, 1985.

SONG, L.; IZZUDDIN, B. A.; ELNASHAI, A. S.; DOWLING, P. J. An integrated adaptive environment for fire and explosion analysis of steel frames. Part I: analytical models. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 53, n. 1, p. 63–85, 2000.

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

WANG, Y. C. **Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety**. Spon Press, 2002. 352 P.

VOGEL, U. (1985). Calibration Frames. **Stahlbau**, n. 10, p. 295-301.

WHITE, D. W. (1993). Plastic hinge methods for advanced analysis of steel frames. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 24, n. 2, p. 121-52.

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

ZIEMIAN, R. D. (1993) Examples of frame studies used to verify advanced methods of inelastic analysis. In: WHITE, D. W.; CHEN, W. F. **Plastic hinge based methods for advanced analysis and design of steel frames: an assessment of the state-of-the-art**. Structural Stability Research Council, Lehigh University, Bethlehem, PA.