

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS EM PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COM SEÇÃO TRANSVERSAL SIGMA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Isabela B. Santiago

Francisco C. Rodrigues

Rodrigo B. Caldas

ibotelhosantiago@gmail.com

francisco@dees.ufmg.br

caldas@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais

Avenida Antônio Carlos, 6625, EE, Bloco 1, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

João Paulo C. Rodrigues

jpaulocr@dec.uc.pt

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Rua Luís Reis Santos - Polo II da Universidade, 3030-788, Coimbra, Portugal

Resumo. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos capaz de prever o comportamento à flexão de vigas em perfis de aço formados a frio submetidas a flexão em situação de incêndio. As simulações numéricas foram realizadas com o auxílio do programa de elementos finitos *Abaqus* e o modelo numérico foi comparado com resultados experimentais, a fim de validar o modelo de elementos finitos desenvolvido e, conseqüentemente, obter resultados numéricos confiáveis. Neste trabalho são fornecidos detalhes da metodologia utilizada nas simulações para alcançar a estabilidade numérica e a representação fiel do comportamento estrutural das vigas estudadas. Por fim, para realizar a verificação da precisão do modelo numérico, os resultados numéricos e experimentais foram comparados em termos de forças de restrição axial, deslocamentos verticais, temperaturas críticas e modos de colapso, com o objetivo de entender as potencialidades que o programa fornece na modelação de estruturas em situação de incêndio.

Palavras chaves: Perfil de aço formado a frio, Vigas, Sigma, Modelação numérica, Incêndio

Abstract. This paper presents the development of a finite element model suitable for predicting the flexural behaviour of cold-formed steel beams under fire conditions. The numerical simulations were performed with the finite element program *Abaqus* in order to understand the potential that this program provides in modelling cold-formed steel under fire conditions. This paper provides details of the simulation methodology for achieving numerical stability and faithful representation of detailed structural behaviour under fire condition. The assessment of the accuracy of the developed numerical model was conducted by comparing the axial restraining forces, vertical displacements, critical temperatures and failure modes obtained from finite element simulations with some experimental results, in order to validate the developed finite element model and to consequently obtain reliable numerical results.

Keywords: Cold formed steel, Beams, Sigma, Numerical modelling, Fire resistance

1 Introdução

Os perfis de aço formados a frio (PFF) estão se tornando cada vez mais populares na construção civil, devido às inúmeras vantagens apresentadas por esse sistema construtivo quando comparado com outras soluções construtivas mais tradicionais. Uma das grandes vantagens dos perfis obtidos por conformação a frio de chapas finas de aço é a grande variedade de seções transversais que podem ser fabricadas, possibilitando assim, sua aplicação em diferentes áreas, atendendo aos mais diversos sistemas estruturais e construtivos. Ademais, a facilidade de sua produção, montagem e transporte, devido ao baixo peso dos perfis, conferido por suas espessuras reduzidas, torna seu uso ainda mais difundido.

No entanto, a elevada esbelteza dos elementos que compõe sua seção transversal e a baixa rigidez à torção - ocasionada pela não coincidência dos centros de cisalhamento e gravidade apresentada pela maioria de suas seções - fazem com que os perfis estejam altamente sujeitos a fenômenos de instabilidade local, global, distorcional e suas interações [1], acarretando em complexos métodos de cálculo para o seu dimensionamento.

Entender e lidar com esses fenômenos vem sendo alvo de pesquisas recentes. Todavia, o que se observa é que, em sua grande maioria, os pesquisadores analisam os perfis em condições de temperatura ambiente, sendo ainda necessário aprofundar os estudos no que diz respeito a temperaturas elevadas. Essa escassez de estudos do comportamento dos PFF na presença de fogo, traduz-se na ausência de métodos específicos para a verificação de segurança contra incêndio, resultando em diretrizes de dimensionamentos ao fogo inadequadas para esse tipo de estrutura [2-5].

Nesse contexto, as simulações computacionais tornam-se extremamente importantes na avaliação desse tipo de elemento, uma vez que modelos numéricos de elementos finitos conseguem representar adequadamente o comportamento de vigas em perfis de aço formados a frio em temperaturas elevadas [6-7], sendo considerados uma alternativa válida para testes experimentais, economizando recursos, tempo e custos. E, ainda, o modelo calibrado será usado para conduzir com precisão estudos paramétricos futuros para fornecer dados valiosos para ajudar a desenvolver novas metodologias de cálculo para esse tipo de estrutura.

Nesse sentido, o presente artigo visa descrever o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos capaz de prever o comportamento estrutural e térmico de vigas em PFF submetidas à flexão em situação de incêndio, bem como investigar a influência da restrição axial e rotacional no comportamento dessas vigas. Para tanto, vigas com seção transversal do tipo sigma (S) foram modeladas utilizando o programa de elementos finitos *Abaqus/CAE* [8] e os resultados das análises de elementos finitos foram comparados e validados com os resultados experimentais obtidos por Laím *et al.* [9]. Para averiguar a precisão do modelo foram comparados os resultados obtidos experimentalmente e numericamente em termos da força axial de restrição, dos deslocamentos verticais, das temperaturas críticas e dos modos de flambagem.

2 Modelação de elementos finitos

2.1 Considerações gerais

Com o objetivo de simular o comportamento estrutural de vigas em perfis de aço formados a frio submetidos a flexão em situação de incêndio, modelos numéricos foram desenvolvidos utilizando o *software Abaqus* [8] (versão 6.14-1) - uma poderosa ferramenta de cálculo avançado para modelação de estruturas com comportamento geométrico e material não-linear, como é o caso em estudo. Os modelos foram construídos baseados no sistema experimental dos autores Laím *et al.* [9] e a calibração foi feita comparando os resultados obtidos por meio das análises numéricas com os obtidos a partir dos testes experimentais. A modelação numérica compreendeu a construção de modelos térmicos e estruturais, que depois de calibrados resultaram em modelos capazes de fornecerem

resultados confiáveis acerca do comportamento estrutural das vigas em PFF em situação de incêndio. Nessa seção, primeiramente será realizada uma breve descrição do sistema experimental e dos procedimentos utilizado nos ensaios, seguida por uma detalhada descrição do desenvolvimento do modelo numérico criado e sua validação com os resultados experimentais disponíveis.

Os estudos desenvolvidos por Laím *et al.* [9] consistiam em 9 testes experimentais em vigas em PFF com seção transversal do tipo sigma (Fig. 1), dos quais 3 contemplaram vigas simplesmente apoiadas, 3 com restrição ao alongamento térmico e os outros 3 com restrição axial e rotacional. Para cada tipo de restrição realizou-se 3 ensaios, de modo a obter uma melhor correlação dos resultados. A Tabela 1 fornece o programa dos ensaios realizados, onde S_RA+RR_3 refere-se ao terceiro (3) ensaio de vigas com seção transversal sigma (S) com restrição axial (RA) e restrição rotacional (RR).

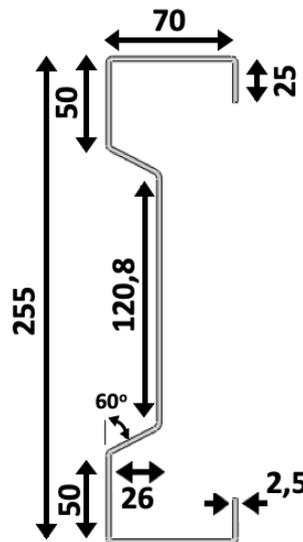


Figura 1. Seção transversal ensaiada (unidades em mm)

Tabela 1. Programa experimental desenvolvidos por Laím *et al.* [9] ($i = 1, 2$ ou 3)

Referência do ensaio	P_0 (kN)	RA (kN/mm)	RR (kN.m/rad)	Repetições
S _i		0	0	3
S_RA _i	11,24	15	0	3
S_RA+RR _i		15	150	3

O sistema experimental utilizado nos ensaios de resistência ao fogo encontra-se esquematizado nas Figs. 2 e 3. Todas as vigas ensaiadas apresentavam um vão de 3000 mm e eram bi-apoiadas, sendo suportadas por um apoio articulado fixo e um articulado móvel. Os modelos foram carregados em dois pontos igualmente afastados em relação aos apoios (1/3 do vão), garantindo um estado de flexão pura entre os dois pontos de aplicação da carga. O sistema compreendeu ainda quatro vigas de restrição, duas delas para simular a restrição axial à expansão térmica da viga e as outras duas com o objetivo de simular a rigidez rotacional dos apoios da viga, de forma a estudar separadamente os efeitos da restrição axial e rotacional.

Os ensaios foram realizados em duas etapas: Carregamento e Aquecimento. Primeiro, os modelos foram carregados sob controle de força e velocidade constante de 0,1 kN/s, até atingir a carga que origina um momento uniforme no meio do vão correspondente a 50% do valor do momento resistente em temperatura ambiente, calculado de acordo com o método proposto pelo Eurocode 3 [10-12]. Este carregamento pretendia simular a carga de serviço na qual a viga estaria sujeita em uma estrutura real.

Após a carga desejada ser atingida, iniciou-se o estágio de aquecimento utilizando um forno elétrico (Fig. 3), tentando ao máximo reproduzir a curva de incêndio padrão ISO834 [13]. Durante o período de aquecimento a carga foi mantida constante até o modelo falhar.

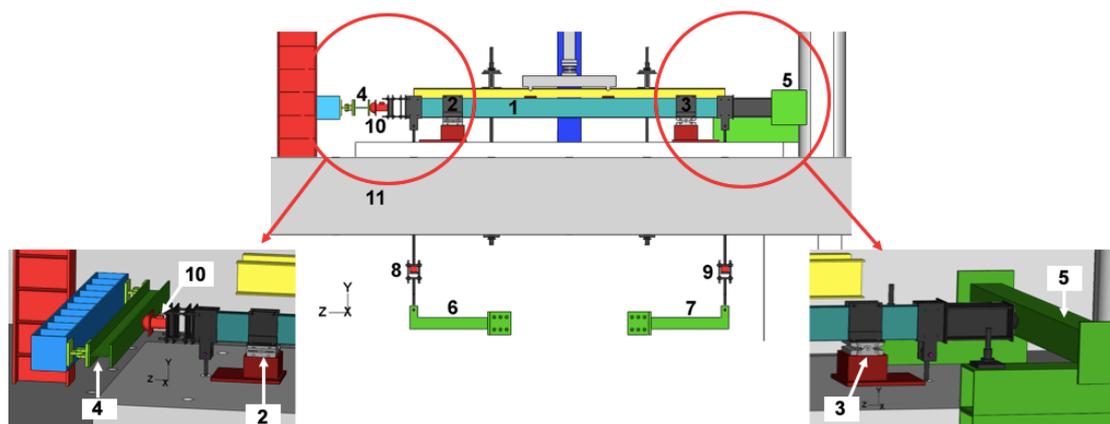


Figura 2. Sistema experimental detalhado: (1) viga ensaiada; (2) apoio articulado móvel; (3) apoio articulado fixo; (4 e 5) vigas de restrição axial; (6 e 7) vigas de restrição rotacional; (8, 9 e 10) células de carga; (10) laje de concreto [9]

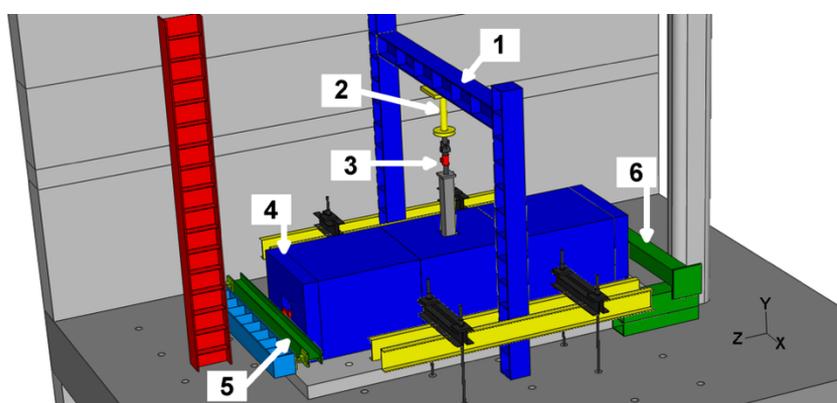


Figura 3. Vista geral do esquema dos ensaios em situação de incêndio: (1) pórtico de reação; (2) atuador hidráulico; (3) células de carga; (4) forno elétrico; (5 e 6) vigas de restrição axial [9]

Posteriormente serão descritos em detalhes os parâmetros e considerações adotados no desenvolvimento do modelo numérico para prever o comportamento dessas vigas.

2.2 Métodos de análise

Para a realização do estudo foram construídos dois modelos: (i) modelo térmico; e (ii) modelo estrutural. Com base no modelo estrutural em situação de incêndio, dois tipos de análise foram realizados. Primeiramente, foi realizada uma análise de instabilidade elástica a fim de estabelecer os possíveis modos de flambagem das vigas e, conseqüentemente, de obter as imperfeições geométricas iniciais a serem introduzidas no modelo não-linear. Tentando reproduzir totalmente a deformada final das vigas observada nos ensaios [9] considerou-se uma interação entre diferentes modos de instabilidade e os valores máximos assumidos para a magnitude das imperfeições foram: $L/500$ para imperfeições globais, $2t$ para imperfeições de distorção e $h/100$ para imperfeições locais, onde L corresponde ao comprimento do vão da viga e t a espessura da seção transversal.

Após a introdução das imperfeições geométricas no modelo, efetuou-se a análise estática considerando a não linearidade material e geométrica para todas as condições de restrições ensaiadas [9]. Optou-se por uma análise do tipo “static general” [8] com o método de solução *Newton-Raphson*, devido a este método ter provisão para estabilização numérica requerida durante a análise.

No que diz respeito ao modelo térmico, foi realizada uma análise de transferência de calor, para conhecer a evolução da temperatura ao longo da seção transversal do perfil durante o período do incêndio, quando este está submetido a uma taxa de aquecimento igual ao aquecimento do forno elétrico ao longo da realização dos ensaios [9].

2.3 Modelação geométrica

Para atingir o objetivo proposto, um modelo numérico tridimensional foi criado tentando replicar o sistema experimental [9] previamente mencionado (Fig. 2). A seção transversal da viga de PFF foi modelada e, adicionalmente, quatro placas rígidas foram criadas separadamente e fixadas à viga, com o objetivo de simular o teste de flexão de quatro pontos. Duas delas foram utilizadas para representar os apoios das vigas e as outras duas foram usadas para aplicar uma carga uniformemente distribuída sob a superfície da viga. O modelo 3D está representado na Fig. 4.

2.4 Carregamento e condições de contorno

Para simular a resposta estrutural das vigas estudadas, um modelo numérico tridimensional foi construído. A carga aplicada foi simulada com forças nodais concentradas (direção -Y) atuando verticalmente no meio de chapas rígidas conectadas à mesa superior das vigas. Os pontos de aplicação da carga distavam entre si um valor de um terço do vão da viga, de modo que seu vão ficasse dividido em três partes iguais, garantindo que o um terço central (entre as cargas concentradas) estivesse submetido à flexão pura.

Para assegurar que as condições de contorno de uma barra bi-apoiada, um ponto de referência no meio da chapa rígida anexado a viga foi selecionado para controlar o movimento daquela superfície. O ponto de referência usado para representar o apoio articulado fixo foi restringido contra todos os graus de liberdade, excluindo a rotação em torno do eixo X. Por outro lado, para simular o apoio articulado móvel, o deslocamento ao longo do eixo horizontal (direção Z) foi liberado. Além disso, para evitar a rotação lateral e a rotação segundo o eixo de menor inércia das vigas, todos os nós das seções transversais localizadas nas extremidades dos apoios foram restringidos contra a translação lateral (direção X). Finalmente, as extremidades das vigas foram acopladas a pontos de referência localizados na alma do perfil, onde um sistema elástico linear de molas foi associado para simular as condições de restrição axial e rotacional nas vigas, tais como nos ensaios. Os valores da rigidez da mola axial foram os mesmos considerados nos ensaios [9].

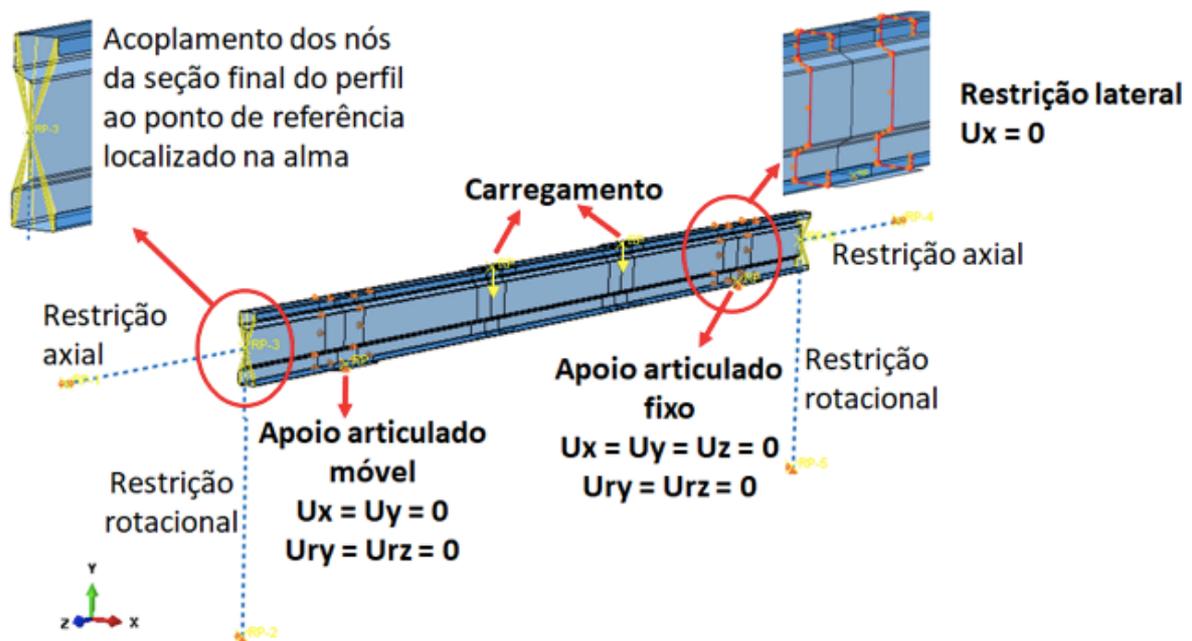


Figura 4. Modelo de elementos finitos desenvolvido para vigas sigma com restrição axial e rotacional

A temperatura durante os testes experimentais foi medida em diferentes pontos da seção transversal da amostra. Assim, para reproduzir no modelo estrutural a distribuição de temperatura não

uniforme observada nos ensaios, as áreas de influência foram definidas dependendo da posição onde estava locado cada termopar. Para simular o aquecimento das vigas, assumiu-se que as temperaturas nestas áreas eram uniformes e iguais aos respectivos termopares e cada temperatura medida era introduzida ao longo dessa área em função do tempo. É importante mencionar que a temperatura foi considerada uniforme na direção longitudinal da viga e foi considerada uniforme e igual a 20°C nos apoios da viga, de forma a simular uma manta térmica que foi utilizada ao longo dos ensaios para proteger os apoios (Fig. 5).

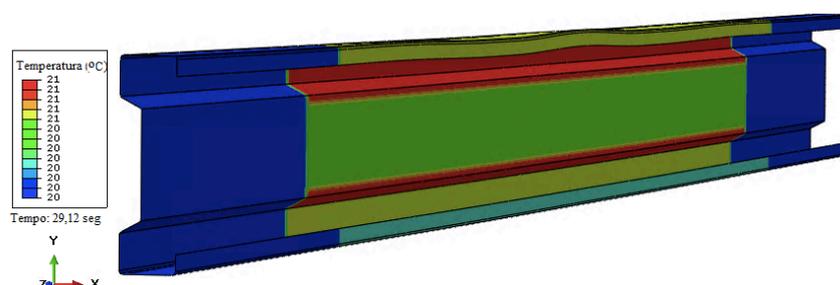


Figura 5. Distribuição de temperatura introduzida no modelo estrutural

Na análise térmica a troca de calor com o ambiente foi simulada através de dois tipos de superfície: “*surface film condition*” e “*surface radiation*” [8], que correspondem respectivamente à transferência de calor por convecção e radiação. Em relação às variáveis que definem a troca de calor por radiação, tem-se a constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ e a emissividade resultante do perfil com o valor de $\epsilon = 0,2$ (considerando a emissividade da resistência elétrica do forno e do aço galvanizado das vigas iguais a 0,7 e 0,3, respectivamente), devido à superfície espelhada do revestimento de zinco [13] dos perfis utilizados. A constante de troca de calor por convecção - da superfície exposta à ação térmica - foi definida como $15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [7] e o aquecimento das vigas seguiu o desenvolvimento das curvas de aquecimento medidas no interior do forno elétrico ao longo dos ensaios.

2.5 Tipo de elemento finito

Para a simulação do comportamento estrutural, optou-se por discretizar as vigas usando o elemento finito tridimensional do tipo S4R (Fig. 6), que vem sendo utilizado com sucesso por diversos autores [2, 6 e 7] para modelar elementos estruturais de paredes finas em temperatura elevada. Este elemento é um elemento finito de casca (S - *shell*) de quatro nós (4), cada um com seis graus de liberdade (três componentes de translação e três de rotação), com integração reduzida (R). Por apresentar um modo de integração reduzida há uma diminuição da matriz de rigidez do elemento (integração apenas no ponto central do elemento), promovendo um menor esforço computacional. Já para as simulações do processo de transferência de calor utilizou-se elementos finitos do tipo DC2D4, um elemento finito compatível com processos de transferência de calor (DC), de geometria bidimensional (2D) com quatro nós (4).

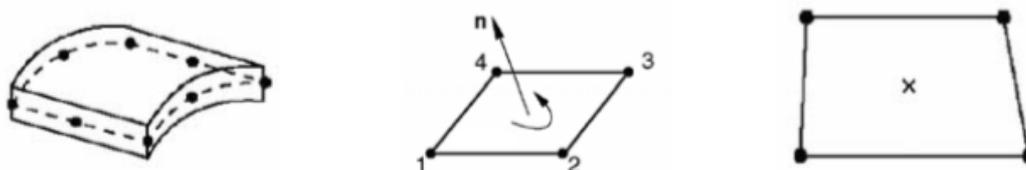


Figura 6. Elemento finito do tipo casca S4R [8]

2.6 Malha de elementos finitos

A densidade da malha adotada para o processamento, se tratando de uma análise numérica pelo

método dos elementos finitos, apresenta uma grande importância nos valores dos resultados obtidos, uma vez que diferentes divisões de malhas podem interferir fortemente nos valores encontrados na análise. O uso de malhas com um número reduzido de elementos pode acarretar em resultados com baixa precisão, já uma malha muito densa aumenta consideravelmente o número de equações a serem resolvidas pelo programa e, assim, conseqüentemente o tempo de processamento e o armazenamento necessários tornam-se muito elevados.

Dessa maneira, análises de sensibilidade de malha foram realizadas com o objetivo de definir um modelo de elementos finitos apropriado e preciso com um tempo computacional reduzido. Ao realizar análises de sensibilidade, um tamanho de malha de 10 mm x 30 mm para os elementos planos da seção transversal foi considerado ótimo, de modo que um refinamento adicional não forneceu uma melhoria notável na precisão. Entretanto, para alcançar melhores resultados, as regiões de canto arredondados foram refinadas, utilizando elementos menores (Fig. 7). No que diz respeito à análise térmica, as seções foram discretizadas em elementos finitos de dimensão 0,5 x 0,5 mm [14].

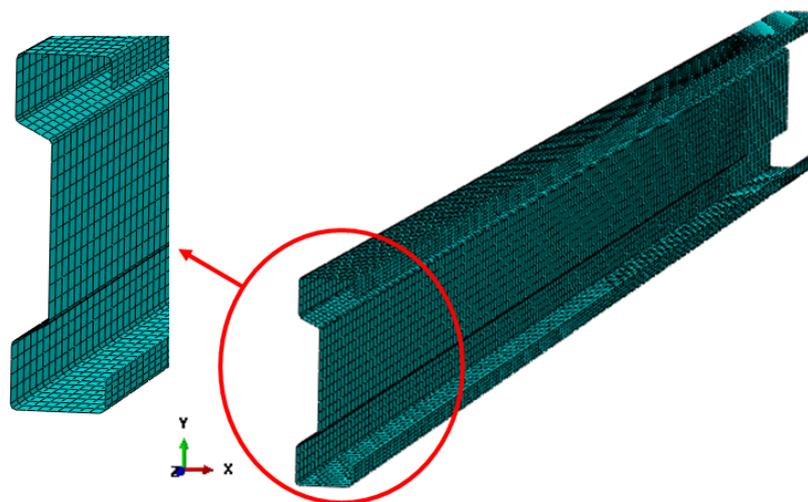


Figura 7. Densidade da malha de elementos finitos adotada para o modelo estrutural

2.7 Propriedades térmicas e mecânicas do aço

Quando exposto ao fogo, a capacidade resistente do aço é afetada pela redução de sua resistência ao escoamento (f_y) e de seu módulo de elasticidade longitudinal (E) em função da elevação da temperatura, bem como pelo surgimento de esforços adicionais induzidos pela restrição à expansão térmica do material e tensões secundárias que podem ser desenvolvidas devido às deformações provocadas por um gradiente de temperatura. Dessa forma, para prever numericamente o comportamento de vigas submetidas a elevadas temperaturas é fundamental que a quantificação das propriedades mecânicas e térmicas do aço que as compõem seja adequada.

Para tanto, nos modelos estruturais, foi considerado um comportamento reológico não-linear e isotrópico, com critério de escoamento de Von Mises. Adotou-se para análise não-linear curvas de tensão x deformação do aço obtidas a partir do modelo proposto por Laím *et al.* [5] e com base nas curvas reais obtidas de ensaios de tração por Craveiro *et al.* [15]. Este modelo à temperatura ambiente é composto por um comportamento gradual do escoamento do aço seguido por um período considerável de endurecimento por deformação, com uma tensão de escoamento correspondente a 0,2% de deformação residual de 320 MPa, uma resistência à tração de 390 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa. As propriedades mecânicas do aço dos PFF foram consideradas uniformes em toda a seção transversal, uma vez que não foram levadas em consideração no estudo as tensões residuais provenientes da fabricação dos perfis formados a frio, conforme sugerido por diversos pesquisadores nesse campo [7,16, 17].

Com o intuito de modelar também as degradações mecânicas do aço com o aumento de temperatura, foram adotados os fatores de redução do módulo de elasticidade e da resistência ao

escoamento do aço a temperaturas elevadas estabelecidos no anexo E da EN 1993-1-2 [18]. Para as propriedades térmicas do aço - massa, densidade, condutividade térmica (Fig. 8(b)) e calor específico (Fig. 8(a)) - foram adotadas as previsões apresentadas na EN 1993-1-2 [18], enquanto que o alongamento térmico considerado foi o obtido a partir das previsões propostas por Chen e Young [19], uma vez que as previsões disponíveis na EN 1993-1-2 foram consideradas excessivamente conservadoras para o alongamento térmico [15, 19].

Como a análise de pós-flambagem pode envolver grandes deformações inelásticas, as curvas de tensão (σ_{nom}) e deformação (ϵ_{nom}) nominais foram convertidas em curvas de tensão (σ_{real}) e deformação (ϵ_{real}) verdadeira, utilizando as Eq. (1) e (2). Na Figura 8 (d) as curvas tensão \times deformação para diferentes temperaturas usadas como dado de entrada nas simulações numéricas são apresentadas e na Fig. 8 (c) o alongamento térmico relativo.

$$\sigma_{real} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}). \quad (1)$$

$$\epsilon_{real} = \ln (1 + \epsilon_{nom}). \quad (2)$$

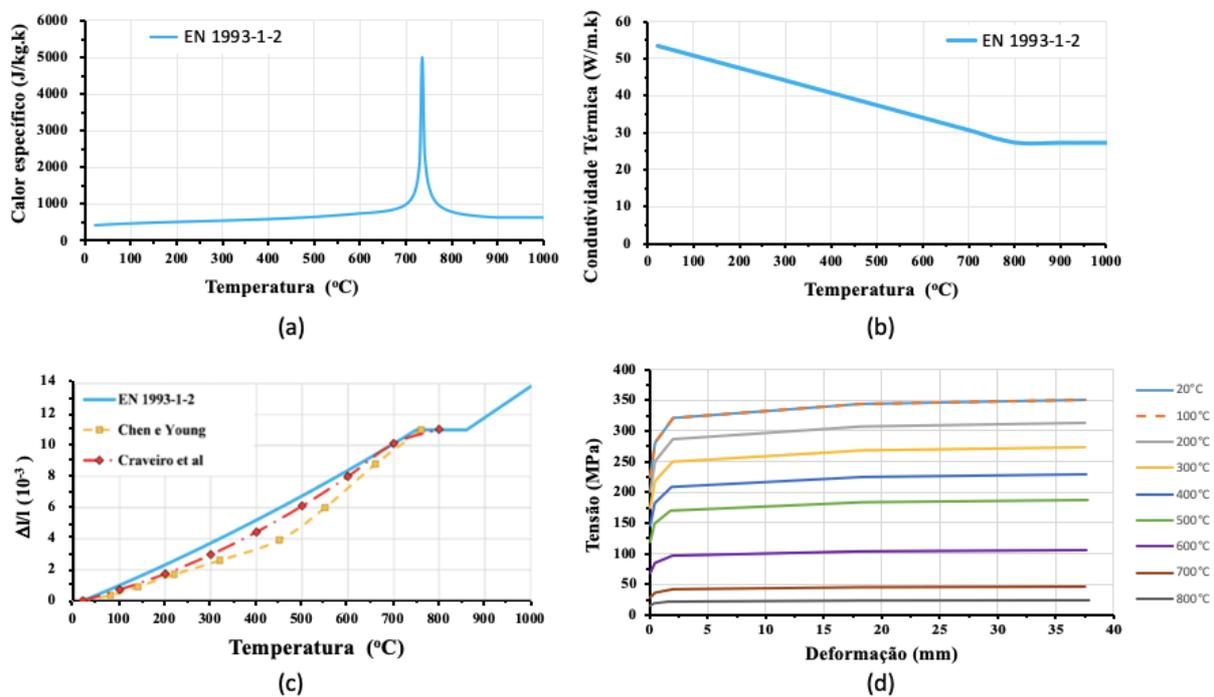


Figura 8. Propriedades térmicas do aço: (a) Calor específico [18]; (b) Condutividade térmica [18]; (c) Alongamento térmico [15, 18 e 19]; (d) Curvas tensão \times deformação do aço S320, em função da temperatura

3 Validação do modelo de elementos finitos

3.1 Calibração do modelo térmico

A calibração do modelo térmico foi feita a partir da variação de dois parâmetros: (i) os coeficientes de transferência de calor por radiação e ; (ii) as superfícies afetadas por efeitos da convecção e radiação. Foram feitas diversas combinações desses parâmetros até se obter a que melhor representasse a distribuição de temperatura na seção transversal registrada ao longo dos ensaios. É importante ressaltar que para as superfícies não expostas ao fogo, foi considerada a transferência de calor apenas por condução térmica.

Nas Figuras 9 e 10 estão representadas, respectivamente, a distribuição e evolução de temperatura ao longo da seção transversal da viga sigma, comparando os resultados obtidos experimentalmente e

numericamente. Essas figuras são referentes a calibração das vigas restritas axialmente. O mesmo procedimento foi aplicado para as vigas simplesmente apoiadas e para as vigas com restrição rotacional.

A partir da Figura 10 é possível verificar uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, obtendo também resultados satisfatórios para as restantes modelações.

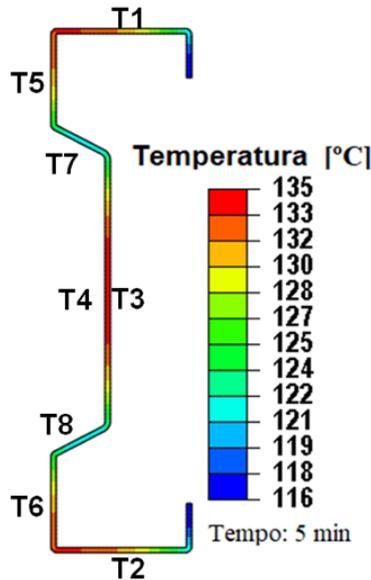


Figura 9. Distribuição da temperatura na seção transversal da viga S_RA em 5 min de análise

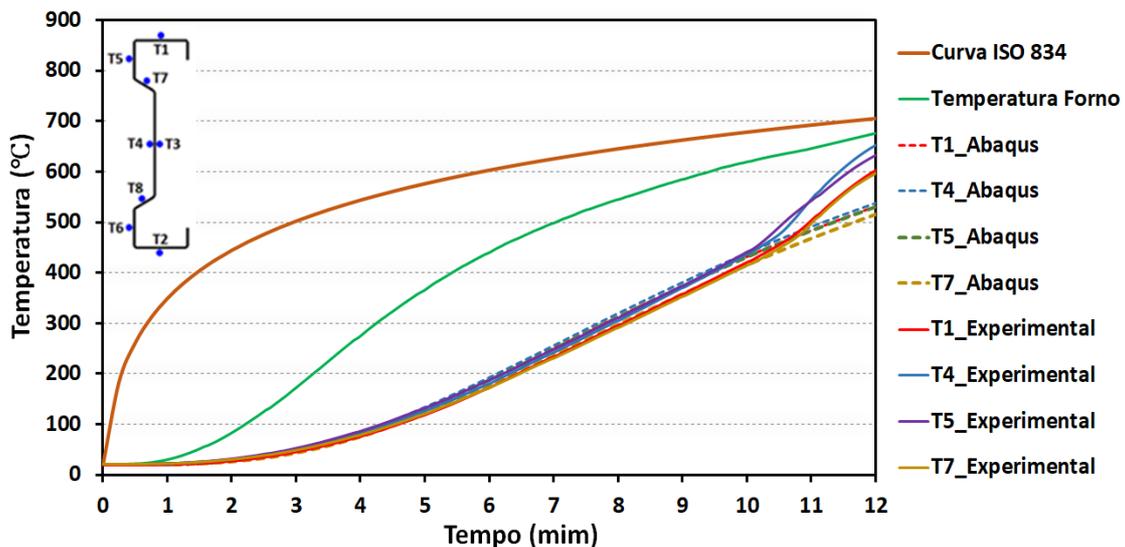


Figura 10. Evolução da temperatura na seção transversal da viga S_RA em função do tempo

3.2 Calibração do modelo estrutural

Com o modelo estrutural pretendeu-se reproduzir o efeito do aumento de temperatura no comportamento estrutural das vigas, tendo como objetivo a obtenção de modelos capazes de reproduzir os resultados experimentais [9].

A avaliação da precisão dos modelos numéricos desenvolvidos foi realizada através da comparação entre as curvas de deslocamento em função da temperatura média das vigas simplesmente apoiadas (Fig. 11) e as curvas de força axial em função da temperatura das vigas com restrição axial (Fig. 12) e rotacional (Fig. 13). Também foram comparadas as temperaturas críticas (Tabela 2) e os

modos de colapso (Fig. 14-16) obtidos a partir das simulações de elementos finitos com os resultados dos ensaios correspondentes.

Em concordância com os testes experimentais [9], a análise numérica se deu em duas etapas: primeiro a carga de serviço (P_0) foi gradualmente aplicada nas vigas e depois, com P_0 mantida fixa, iniciou-se a fase de aquecimento até a estrutura falhar. Considerou-se que houve falha quando a deformação das vigas atingiu um valor limite de deformação de $L^2/(400h) = 88$ mm (critérios de falha em termos de deformação para elementos sujeitos à flexão [13]), que corresponde aproximadamente ao tempo (tempo crítico) no qual as vigas deixam de apresentar qualquer capacidade resistente ao esforço axial, em outras palavras, considerou-se que houve falha quando as forças restritivas ocasionadas pela expansão térmica, retornaram ao valor da carga axial inicial aplicada (critérios de falha em termos de resistência).

Como observado nas Figuras 11 a 13, os resultados obtidos a partir das simulações numéricas foram relativamente próximo dos resultados experimentais, uma vez que todas as curvas estimadas pelo programa de elementos finitos (curva azul intitulada ABAQUS) apresentaram um comportamento próximo às curvas obtidas através dos ensaios [9], especialmente no que diz respeito à força de restrição axial máxima suportada pelas vigas e às temperaturas críticas. Conforme especificado na Tabela 2, as diferenças médias entre as temperaturas críticas obtidas nos ensaios e numericamente são inferiores a 7%, indicando uma boa concordância entre os resultados estimados pelo programa *Abaqus* e os resultados experimentais. Assim, é possível afirmar que o modelo de elemento finito desenvolvido é capaz de reproduzir com precisão o comportamento de vigas de PFF com restrição axial e rotacional sujeitas à flexão em temperaturas elevadas.

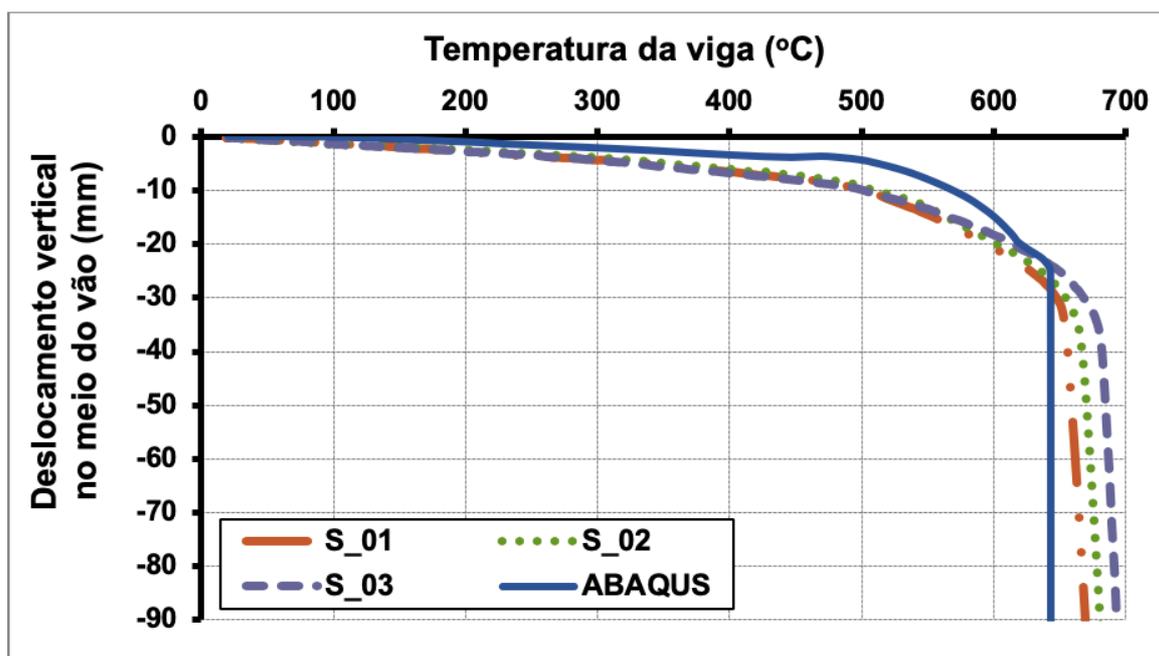


Figura 11. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos das vigas simplesmente apoiadas

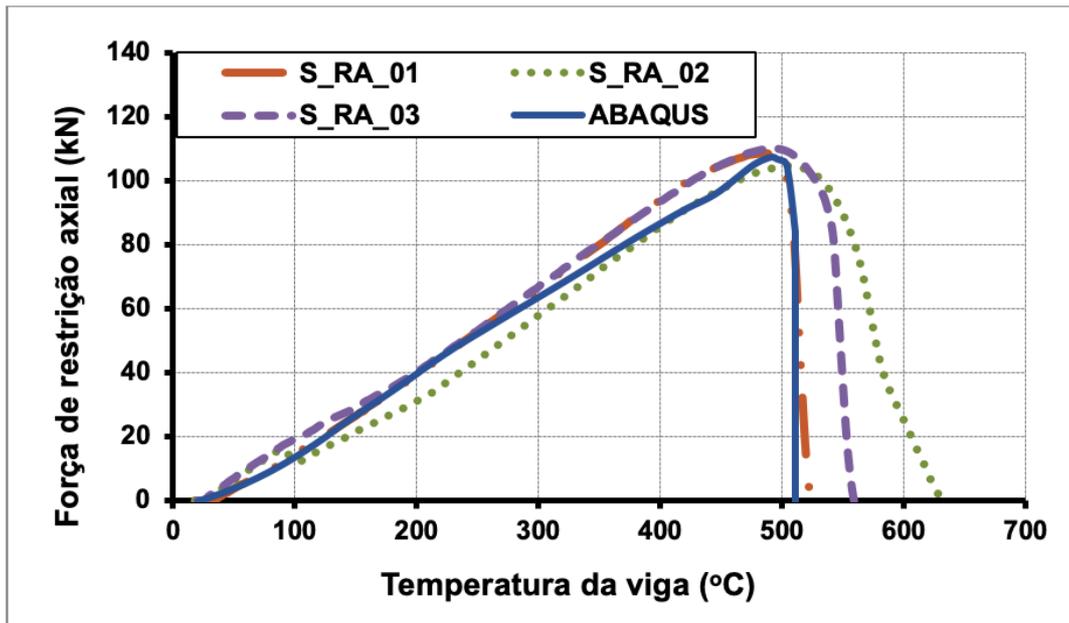


Figura 12. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da viga sigma com restrição axial: S_RA

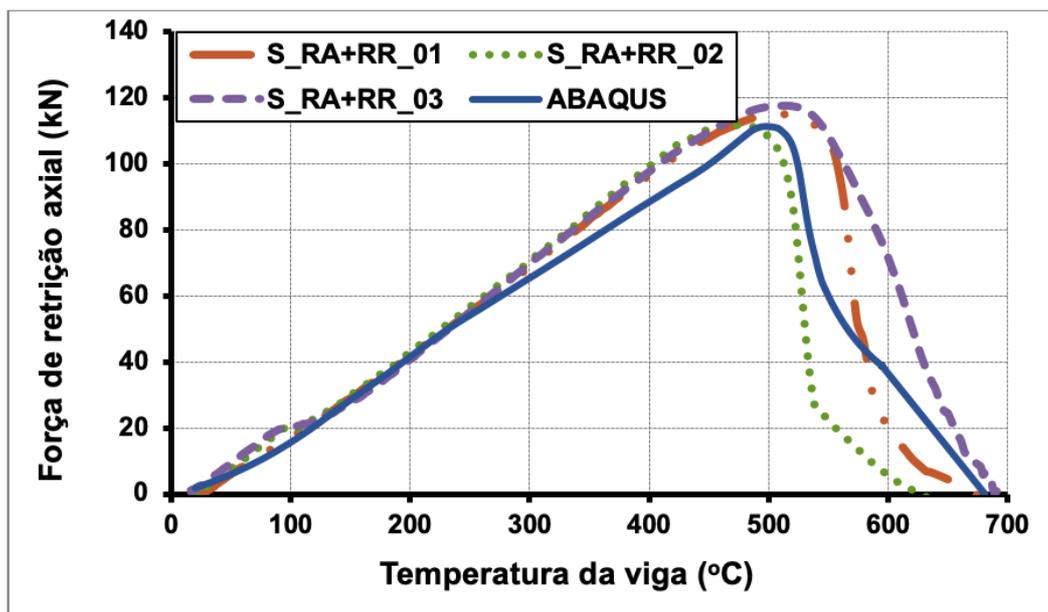


Figura 13. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos das vigas com restrição axial e rotacional: S_RA+RR

Tabela 2. Comparação entre os resultados das vigas sigma simplesmente apoiadas

Referência do ensaio	Temperatura crítica (°C)		Erro relativo (%)
	Experimental	ABAQUS	
S_1	669		-3,95
S_2	680	643	-5,52
S_3	693		-7,22
Média	681	643	-5,58

Tabela 3. Comparação entre os resultados das vigas sigma com restrição axial

Referência do ensaio	Temperatura crítica (°C)		Erro relativo (%)
	Experimental	ABAQUS	
S_RA_1	526		1,04
S_RA_2	607	531	-12,55
S_RA_3	566		-5,83
Média	566	531	-6,11

Tabela 4. Comparação entre os resultados das vigas sigma com restrição axial e rotacional

Referência do ensaio	Temperatura crítica (°C)		Erro relativo (%)
	Experimental	ABAQUS	
S_RA+RR_1	666		2,30
S_RA+RR_2	622	681	9,55
S_RA+RR_3	668		1,94
Média	566	681	4,48

3.3 Comparação entre os modos de Instabilidade

As Figuras 14 a 16 apresenta uma comparação entre a configuração da deformada das vigas após o término dos ensaios realizados por Laím *et al.* [9] (Fig. 14 a 16 (a1, a2)) e a deformação correspondente prevista pela análise numérica (Fig. 14 a 16 (b1, b2)). Em geral, os modos de colapso obtidos foram muito semelhantes aos observados experimentalmente, comprovando a capacidade do programa de elementos finitos *Abaqus* de reproduzir com precisão a resposta experimental de vigas de PFF em temperaturas elevadas, garantindo a validade dos modelos de elementos finitos desenvolvidos.

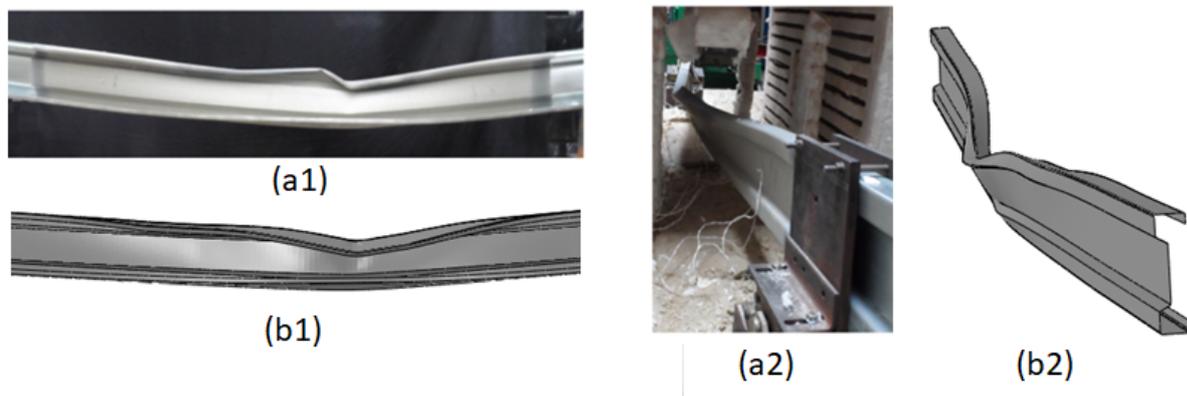


Figura 14. Comparação entre os modos de falha experimentais e numéricos das vigas simplesmente apoiadas: S

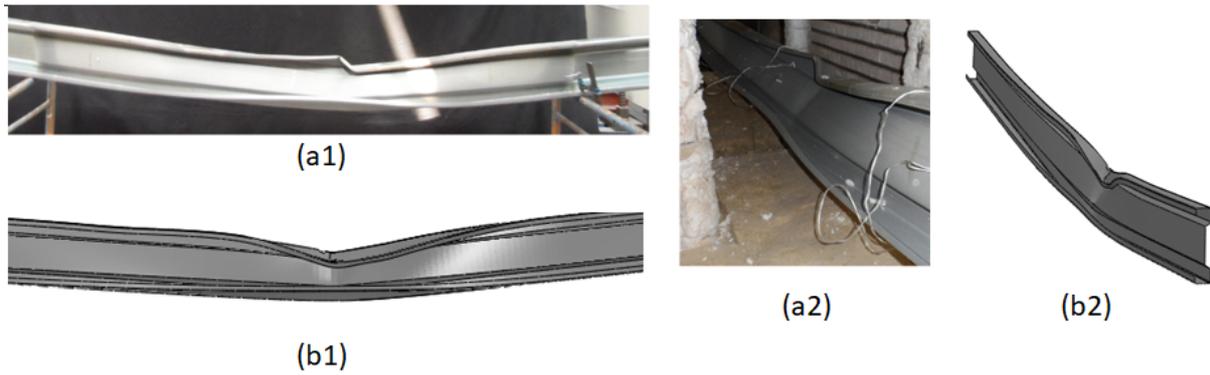


Figura 15. Comparação entre os modos de falha experimentais e numéricos das vigas com restrição axial: S_RA

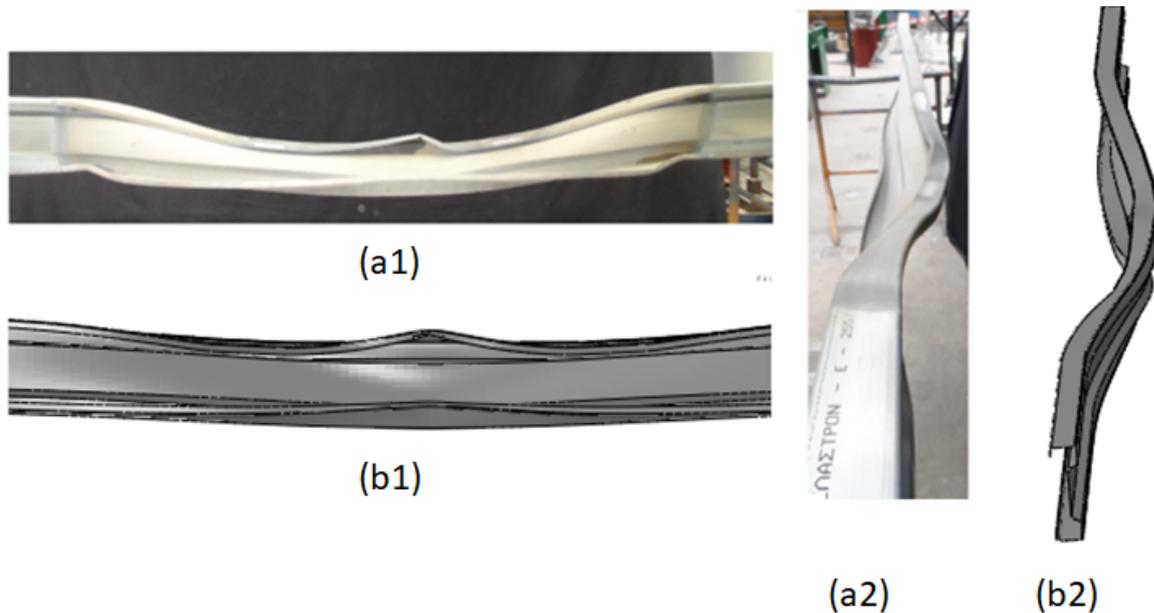


Figure 16. Comparação entre os modos de falha experimentais e numéricos das vigas com restrição axial e rotacional: S_RA+RR

4 Conclusão

No presente artigo foi apresentada a modelação numérica de vigas em perfis de aço formados a frio em situação de incêndio. A análise de elementos finitos pretendeu reproduzir o efeito do aumento de temperatura no comportamento estrutural de vigas sob diferentes condições de restrição, visando obter modelos capazes de reproduzir os resultados experimentais [9].

De modo a estudar o comportamento das vigas sujeitas a temperaturas elevadas foram feitos dois estudos independentes, um relativo à modelação térmica das seções transversais e outro relativo à modelação estrutural das vigas em situação de incêndio. Relativamente à modelação térmica realizada, o *software Abaqus* demonstrou ser uma ferramenta poderosa, obtendo distribuições e evoluções de temperaturas muito semelhantes às observadas experimentalmente.

No que diz respeito à análise estrutural do comportamento ao fogo das vigas, os modelos elementos finitos desenvolvidos foram apresentados e validados em termos das forças máximas de restrição axial, deslocamentos verticais, temperaturas críticas e modos de instabilidade. Após calibrados, foram obtidos modelos estruturais capazes de reproduzir o comportamento das vigas em situação de incêndio, obtendo forças de restrição e temperaturas críticas compatíveis com as obtidas

experimentalmente. A boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos confirma que os modelos de elementos finitos desenvolvidos com o *software Abaqus* também são adequados para prever o comportamento estrutural de vigas de aço formadas a frio sob condições de incêndio.

Assim, pode-se afirmar que os modelos de elementos finitos desenvolvidos podem ser utilizados para realizar com precisão futuros estudos numéricos paramétricos, a fim de modelar a resistência ao fogo e o comportamento dessas vigas com diferentes características das adotadas nos ensaios experimentais originais [9]. Como consequência, fornecendo dados valiosos para ajudar a desenvolver o entendimento detalhado do comportamento à flexão de vigas de PFF submetidas ao fogo.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), à Universidade de Coimbra (UC) e à instituição de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- [1] C. Yu e B. W. Schafer. Local buckling tests on cold-formed steel beams. *International Specialty Conference Cold-Formed Steel Structures (CCFSS XVI)*, USA, Orlando, 2002.
- [2] N.D. Kankanamge e M. Mahendran. Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral-torsional buckling at elevated temperatures, *Thin-Walled Structures*, vol. 61, pp. 213-228, 2012.
- [3] L. Laím, J. P. C. Rodrigues e H.D. Craveiro. Flexural behaviour of axially and rotationally restrained cold-formed steel beams subjected to fire. *Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 39-47, 2016.
- [4] B. Baleshan e M. Mahendran. Fire design rules to predict the moment capacities of thin-walled floor joists subject to non-uniform temperature distributions. *Thin-Walled Structures*, vol. 105, pp. 29-43, 2016.
- [5] L. Laím e J. P. C. Rodrigues. On the applicability and accuracy of fire design methods for open cold-formed steel beams. *J Build Eng*, vol. 8, pp. 260-8, 2016.
- [6] L. Laím, J.P.C. Rodrigues e L. S. Simões. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*, vol. 72, pp. 1-13, 2013.
- [7] L. Laím e J. P. C. Rodrigues. Numerical analysis on axially-and-rotationally restrained cold-formed steel beams subjected to fire. *Thin-Walled Structures*, vol. 104, pp. 1-16, 2016.
- [8] ABAQUS/CAE *Standard User's Manual*, version 6.14-5, Simulia Corp., USA, 2014.
- [9] L. Laím, J. P. C. Rodrigues and H. D. Craveiro. Flexural Behaviour of Beams made of Cold-formed Steel Sigma-shaped Sections at Ambient and Fire Conditions. *Thin-Walled Structures*, vol. pp. 87, 53-65, 2015.
- [10] EN1993-1.1: Design of steel structures. General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [11] EN1993-1.3: Design of steel structures. General rules. Supplementary rules for cold-formed members e sheeting, Brussels, Belgium, 2004.
- [12] EN1993-1.5: Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2006.
- [13] ISO 834-1: Fire resistance tests - elements of building construction, Part 1: general requirements, International Organization for Standardization, Switzerland, Geneva, 1999.
- [14] L. Laím. Experimental e numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams subjected to fire. PhD thesis, University of Coimbra, 2013.
- [15] H. D. Craveiro, J. P. C. Rodrigues, A. Santiago, e L. Laím. Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold formed steel structures - The case of the S280GD+Z steel. *Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 154-168, 2016.
- [16] J. H. Zhang e B. Young. Numerical investigation and design of cold-formed steel built-up open section columns with longitudinal stiffeners. *Thin-Walled Structures*, vol. 89, pp. 178-191, 2015.

- [17] Z. Sadovský, J. Kriváček, V. Ivančo e A. Ďuricová. Computational modelling of geometric imperfections and buckling strength of cold-formed steel. *Jornal of Const. Steel Research*, vol. 78, pp. 1-7, 2012.
- [18] EN1993-1.2: Design of steel structures. General rules. Structural fire design. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [19] J. Chen e B. Young B. Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, vol. 45, pp. 96-110, 2007.