



ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: ESTUDO PARAMÉTRICO

Yagho de Souza Simões

yaghosimoes@usp.br

Carol Ferreira Rezende Santos

carolrezende@usp.br

Rafaella Moreira Lima Gondim Resende

rresende@usp.br

Lisiane Pereira Prado

lisianeprado@usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/ Universidade de São Paulo

Av.Trabalhador são-carlense, 400, Parque Arnold Schmidt,13566-590 - São Carlos, SP, Brasil.

Resumo. As estruturas quando sujeitas a altas temperaturas apresentam redução das propriedades mecânicas, a exemplo da rigidez e resistência, uma vez que ocorre a degradação do material constituinte. Quando se trata de estruturas metálicas, atenção especial é dada, pois o aço não apresenta bom comportamento em situação de incêndio, por apresentar alta condutividade térmica. Em face disso, este trabalho propõe realizar um estudo de vigas de aço sujeitas à ação do fogo, através de uma modelagem numérica termoestructural via Método dos Elementos Finitos com o uso do código computacional ABAQUS. Nesse contexto, a viga de aço foi modelada em aspecto térmico e termoestructural, com o uso de elementos de casca, DS4 e S4R, respectivamente, com aquecimento uniforme, simulando uma estrutura real. Os modelos numéricos foram validados com base em ensaios experimentais. A partir da calibração, realizou-se uma análise paramétrica considerando a variação do fator de carga (25%, 50% e 75%) e da rigidez da ligação viga-pilar, de modo a verificar a influência desses na temperatura crítica e no tempo de resistência ao fogo desse elemento estrutural. Concluiu-se que ambos os parâmetros quando aumentados, reduzem a resistência ao fogo da viga, especialmente o fator de carga.

Palavras-chave: Modelagem numérica termoestructural, Análise paramétrica, análise numérica de viga de aço, incêndio.

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de perfis de aço formados a frio em obras estruturais tem sido cada vez mais frequente devido a suas vantagens técnicas e econômicas, a exemplo da relação capacidade resistente *versus* peso de aço. Em geral, sabe-se que os perfis formados a frio possuem, para uma mesma capacidade resistente, menor peso quando comparada aos perfis de aço laminados a quente, facilitando os processos de transporte e montagem.

Embora a diminuição do peso dos elementos estruturais represente economia ao construtor, é necessário que se entenda que esses estão mais suscetíveis aos fenômenos de instabilidade local, distorcional e global, em relação aos perfis laminados a quente. Isso ocorre devido ao processo de produção, uma vez que, basicamente, esses correspondem a chapas finas de aço dobradas ou perfiladas, em que os elementos que integram a seção transversal possuem relação largura/espessura maiores que as obtidas nos perfis laminados a quente.

Recentemente, o aumento no número de casos de incêndio em edifícios residenciais e comerciais têm levado pesquisadores a questionarem o comportamento dos elementos estruturais quando submetidos a elevadas temperaturas. Foi entendido que a verificação estrutural à temperatura ambiente, embora necessária, não é suficiente para garantir a segurança estrutural, instigando assim a maiores estudos nessa área.

No que diz respeito aos elementos de aço formado a frio em situação de incêndio, sabe-se que a elevada condutividade térmica do aço, associada aos elevados fatores de massividade, conduzem ao rápido aquecimento desses elementos. Como consequência, tem-se a penalização das propriedades mecânicas do aço, tais como, resistência e módulo de elasticidade, conduzindo ao menor tempo de resistência ao fogo.

Devido, principalmente, ao alto custo dos ensaios experimentais, os trabalhos que tratam desse tema, além de recentes, são escassos. Os poucos trabalhos experimentais existentes, como o de Almeida (2012), Laím et al. (2013a) e Landesmann (2014), apontam que, além da degeneração das propriedades mecânicas do aço, as vinculações do elemento exercem considerável influência sobre sua capacidade resistente.

Almeida (2012), a partir de resultados experimentais que reproduziam o comportamento real de uma coluna de perfil formado a frio em situação de incêndio, concluiu que a maior ou menor restrição ao alongamento térmico axial não diminui a carga máxima que pode atuar sobre o elemento, mas sim sobre o tempo resistente e sua temperatura máxima resistente. Tal conclusão também foi verificado por Laím et al. (2013b), em que para vigas biapoeadas sem qualquer restrição foi alcançada uma temperatura crítica em torno de 700°C, reduzindo cerca de 20% para vigas com restrição axial de 3 kN/mm e 30% para restrições axiais de 15 kN/mm.

Laím et al. (2013a) concluiu ainda que a norma europeia EUROCODE 3 Parte 1-2 (2005) é conservativa quando estima a capacidade máxima de vigas de perfis formados a frio em situação de incêndio. Segundo as prescrições normativas, o perfil conserva sua capacidade mecânica até uma temperatura de 350°C, no entanto, conforme observado por Laím e Rodrigues (2011), para certas condições de apoio, esse comportamento é válido para temperaturas até próximas de 700°C.

Atualmente, existem diversas normas nacionais e internacionais que tratam do dimensionamento de estruturas de aço em elevadas temperaturas, com destaque para a Norma

Brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 14323:2013 e a europeia EUROCODE 3 Parte 1-2 (2005). Nelas são abordadas a variação das propriedades mecânicas e térmicas do aço com o aumento da temperatura, as diretrizes básicas para dimensionamento estrutural e recomendações ao uso de métodos avançados de cálculo para a realização térmica e estrutural.

Em geral, como complemento aos ensaios experimentais, tem-se o desenvolvimento de modelos numéricos via Método dos Elementos Finitos que, desde que calibrados e validados com resultados experimentais, podem reproduzir o comportamento experimental e permitem extrapolar as análises a partir da parametrização de diversos parâmetros do próprio ensaio.

É nesse contexto que se insere esse trabalho. Propõem-se, com base dos resultados experimentais de flexão em vigas obtidos por Laím et al. (2013a), a construção e calibração de um modelo numérico, a partir do qual será realizado um estudo paramétrico considerando variações na intensidade do carregamento aplicado e restrições de apoio. Embora citado alguns trabalhos, o entendimento do comportamento mecânico de vigas de perfis formados a frio em situação de incêndio ainda não é totalmente consolidado. Grande parte dessa limitação deve-se aos poucos ensaios experimentais e as várias tipologias vinculações existentes, justificando assim esse artigo.

2 ENSAIO EXPERIMENTAL

Os resultados experimentais adotados na validação do modelo numérico, proposto nesse estudo, foram obtidos por Laím et al. (2013a). O autor realizou ensaios à flexão de vigas metálicas de perfil formado a frio em situação de incêndio, considerando diferentes tipos restrições em sua extremidade. O perfil estudado possuía como material o aço estrutural S280GD e seção transversal C com 2 mm de raio interno de curvatura e 2,5 mm de espessura. As demais dimensões são ilustradas na Fig. 1.

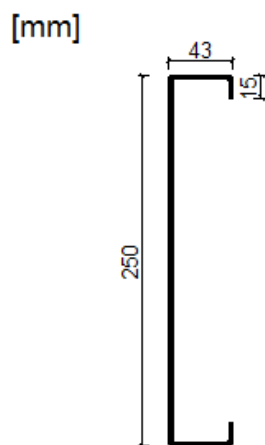


Figura 1. Seção Transversal

O carregamento foi aplicado em 2 pontos na face superior e correspondia a, aproximadamente, 30% da carga de projeto no estado limite último, determinada segundo as prescrições do EUROCODE 3 Parte1-2 (2005) para vigas em temperatura ambiente. Após aplicação do carregamento e mantendo-o constante, procedeu-se ao incêndio. O esquema geral do ensaio é apresentado na Fig. 2.

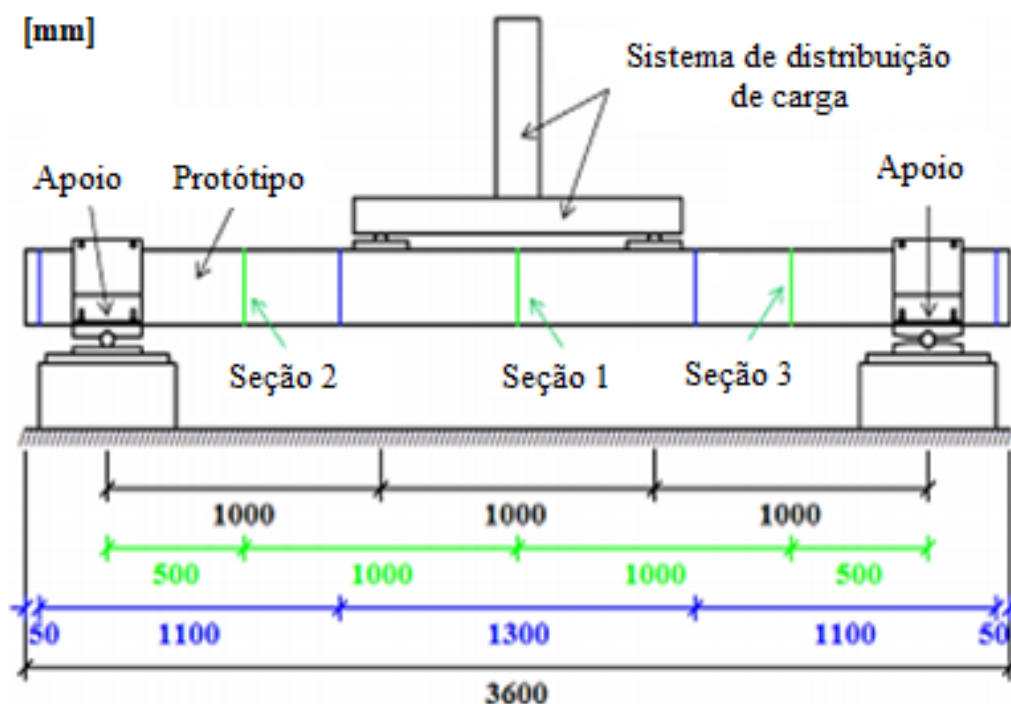


Figura 2. Vista esquemática do ensaio de flexão nas vigas (Laím et al., 2013a)

Como pode ser vista ainda na Fig. 2, as temperaturas foram medidas em três seções distribuídas ao longo do comprimento da viga. Apesar disso, a validação dos modelos numéricos foi realizada por meio da seção 2. Nos ensaios foram posicionados quatro termopares para mensurar a temperatura do perfil de aço. Eles possuíam como nomenclatura θ_s^{Si-j} , em que “i” representa a seção e “j”, a posição do termopar. Maiores detalhes da instrumentação serão apresentados no item de validação dos resultados.

No que concerne aos procedimentos de ensaio, as vigas foram inteiramente posicionadas dentro do forno. Elas tinham comprimento de 3600 mm, ao longo das quais foram posicionados dois apoios externos, um de primeiro e outro de segundo gênero, à 300 mm das extremidades, resultando em um vão de 3000 mm (Fig. 2). Embora esse seja o vão de flexão, não corresponde ao vão exposto ao incêndio, uma vez que, para evitar danos aos apoios, devido à ação do fogo, foram aplicadas mantas cerâmicas de 5 cm de espessura em partes da viga. Assim, o vão efetivamente exposto ao incêndio possuía comprimento de 2500 mm, distante 25 mm de cada um dos apoios. Na Fig. 3a e 3b são apresentados a montagem do ensaio.

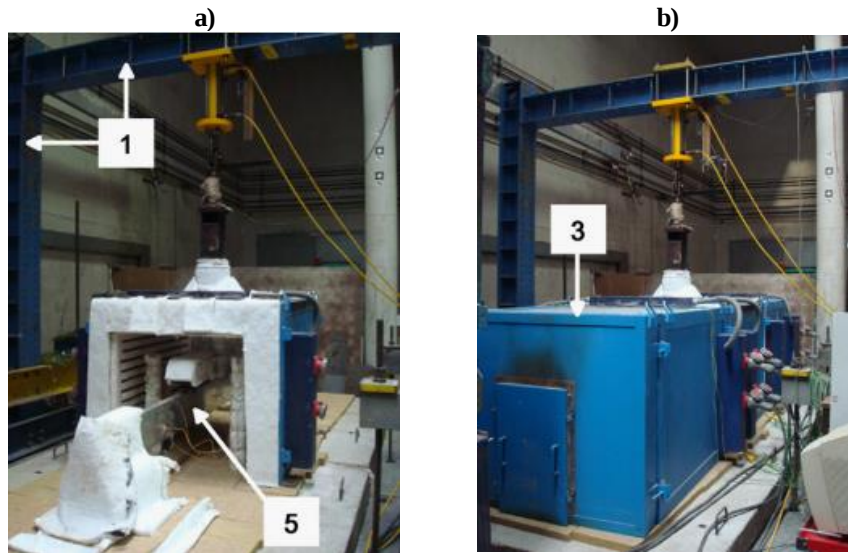


Figura 3. a) Detalhe do esquema de proteção térmico; b) Detalhe do forno (Laím et al., 2013a)

Os protótipos, em função das restrições ao alongamento axial e rotação da seção provocadas pelo incêndio, foram divididos em 3 grupos. No primeiro grupo, denominado apenas com C_, são representadas as vigas que não apresentaram nenhuma restrição ao alongamento e ao giro e, portanto, estavam livres para se deformar. Já no segundo grupo, denominado C_ka, as vigas possuíam apenas restrições axiais, enquanto que no grupo C_ka + kr, elas possuíam tanto restrições axiais, quanto rotacionais. A intensidade das restrições axiais e rotacionais foram, respectivamente, da ordem de 15 kN/mm e 150 kNm/rad.

As propriedades mecânicas verificadas para os protótipos, a temperatura ambiente, foram módulo de elasticidade (E) igual à 208 GPa, tensão de escoamento (f_y) de 295 MPa e tensão última (f_u) de 412 MPa. Os resultados obtidos, e de particular interesse nesse artigo, serão apresentados no item 4, que consiste na validação dos modelos numéricos. Para não fugir ao escopo desse estudo, apenas foi apresentado as informações necessárias para montagem do modelo numérico, assim, maiores informações sobre o ensaio experimental podem ser verificadas em Laím et al. (2013a).

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 Aspectos gerais da modelagem numérica

O código computacional ABAQUS foi utilizado para realização da modelagem numérica deste artigo, uma vez que ele é capaz de solucionar uma gama de problemas de engenharia utilizando a técnica do Método dos Elementos Finitos. Em seu guia de acesso aos usuários, o programa fornece diversos elementos finitos que podem ser utilizados na análise numérica. Diante das possibilidades, escolheu-se o elemento de casca para representar a viga de aço.

Há dois tipos de elemento de casca (*Shell*), o convencional e o contínuo, como pode ser visualizado na Fig.4. Eles são diferenciados pela quantidade de nós por elemento, graus de liberdade e forma de representação tridimensional. Optou-se pelo elemento do tipo convencional, porque o mesmo possui como graus de liberdade a rotação e o deslocamento nas três direções X, Y e Z, o que será útil nos modelos termoestruturais, com o intuito de representar a restrição presente nos ensaios experimentais através de molas nas extremidades.

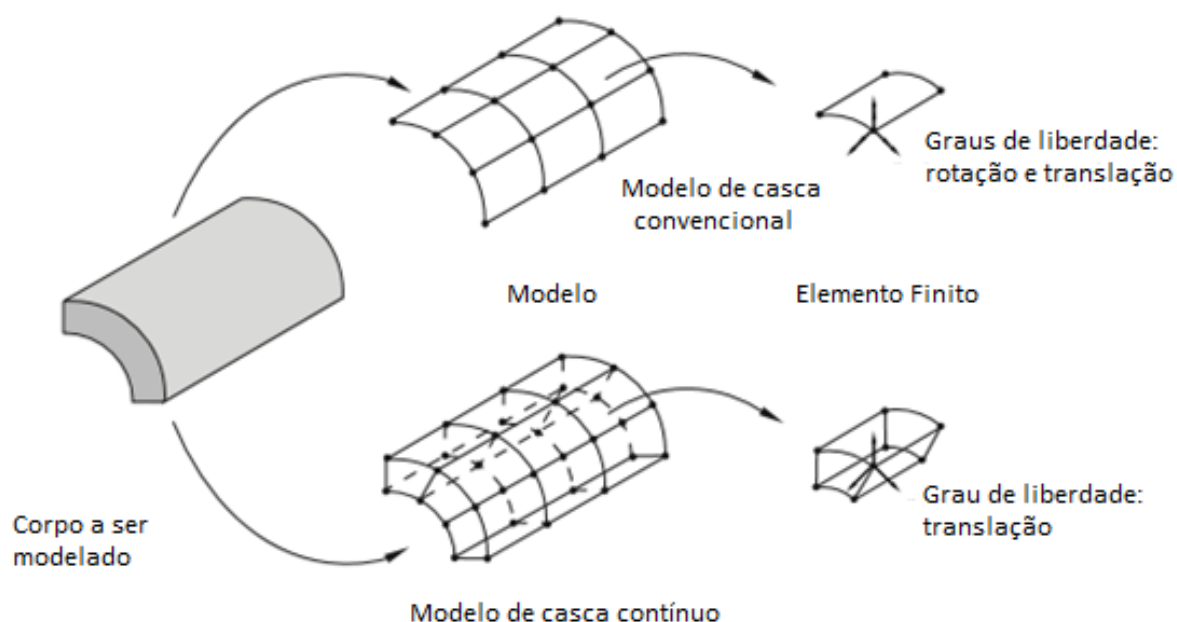


Figura 4. Características do elemento finito do tipo Shell (ABAQUS, 2013)

A modelagem em situação de incêndio foi dividida em três etapas. A primeira foi baseada na análise térmica em que se determinou o campo de temperaturas do elemento estrutural. A segunda consistiu na análise de instabilidade elástica da viga a temperatura ambiente, de modo a considerar as imperfeições geométricas do tipo local e global. E, por último, a etapa termoestrutural, em que o elemento estrutural imperfeito foi carregado e, posteriormente, aquecido com o campo de temperaturas definido na etapa 1. Analisou-se, principalmente nessa fase, o desenvolvimento das forças axiais e deslocamentos ao longo do aquecimento. Vale ressaltar que na análise térmica, o elemento finito foi o *Shell* DS4, enquanto que nas demais etapas, ele passou a ser o *Shell* S4R, uma vez que em cada tipo de análise (térmica, estrutural e termoestrutural), o elemento de casca assume uma determinada nomenclatura no código computacional ABAQUS.

Para caracterização do aço no modelo numérico foi utilizado o modelo elastoplástico perfeito sem encruamento, com módulo de elasticidade e tensão de escoamento igual aos verificados experimentalmente por Laím et al. (2013a).

3.2 Modelagem numérica térmica

O ABAQUS adota o princípio da conservação da energia para realização de suas análises térmicas. Nessa pesquisa foi utilizada a análise do tipo transiente, em que as propriedades térmicas dos materiais e a distribuição da temperatura variavam com o tempo.

As condições de contorno necessárias para realização de uma análise térmica são referentes aos três mecanismos de transferência de calor. Para consideração da convecção e radiação acionou-se os comandos “*Surface film condition*” e “*Surface radiation*”, respectivamente, da função *Interaction* do código computacional. A aplicação desses fenômenos se deu a partir da criação de uma superfície no elemento estrutural e inserção das grandezas coeficiente de convecção (α_c), para o primeiro mecanismo, e a emissividade resultante do material (ε) e a constante Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), para o segundo. Já para a condução, forneceu-se ao modelo numérico a densidade, calor específico e a condutividade térmica do aço.

Inicialmente, foram empregados a emissividade resultante igual a 0,7 para a superfície de aço e o coeficiente de convecção equivalente a $25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, como recomendado pelas normas ABNT NBR 14323:2013 e EUROCODE 3 Parte 1-2 (2005) que tratam de estruturas metálicas em elevadas temperaturas. Porém, ao comparar os resultados numéricos com o respectivo ensaio experimental, observou-se discrepância dos resultados. Diante disso, foi necessário a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros citados, de modo a se obter aqueles que geravam resultados satisfatórios. Em relação às demais propriedades térmicas, utilizaram-se aquelas descritas nas normas referenciadas.

No que concerne as curvas de aquecimento empregadas na validação dos três modelos numéricos, foram utilizadas as obtidas nos ensaios experimentais nos 2,5 m centrais do elemento estrutural. Destaca-se ainda que elas se distanciaram da curva de incêndio padrão definida pelas normas ABNT NBR 14323:2013 e EUROCODE 3 Parte 1-2 (2005).

3.3 Modelagem numérica estrutural

A modelagem numérica estrutural em temperatura ambiente consistiu em duas fases. Inicialmente, realizou-se um estudo de instabilidade elástica, por meio da análise de autovalor e autovetor. O autovetor, utilizado na segunda etapa para consideração das imperfeições iniciais, correspondeu ao obtido para o primeiro modo de instabilidade. Para aplicação na segunda etapa, o autovetor foi amplificado por um fator de 0,025.

Após a etapa 1, alimentou-se o modelo com as propriedades mecânicas do aço e levou-se a viga até a falha, para que fosse encontrado o deslocamento correspondente ao carregamento aplicado no ensaio experimental. O valor obtido correspondeu aproximadamente à 0,001 m e foi utilizado na etapa de carregamento do modelo termoestructural.

3.4 Modelagem numérica termoestrutural

Neste estudo foi utilizado um mecanismo sequencial para resolver o problema termoestrutural. Esse consistiu no desenvolvimento, inicialmente desacoplados, do modelo térmico e do modelo estrutural, de forma que as deformações mecânicas não alteraram o campo térmico. Em seguida, foi realizado o acoplamento por meio da transferência do campo térmico, como carregamento para o modelo estrutural.

Dos três modelos aqui representados, dois apresentaram restrição térmica no ensaio experimental. Na análise numérica, esses casos foram simulados por meio do uso de molas nas extremidades das vigas. Assim, a mola recebeu rigidez axial de 15 kN/mm e rotacional de 15 kNm/rad referente a estrutura de restrição, cujos valores correspondem aos obtidos no programa experimental.

O modelo consiste basicamente no perfil de aço e nos apoios. Ainda foram criados nós de referência (RP) ao longo do comprimento da viga, aos quais, para os casos com restrição, foram acoplados os graus de liberdade das extremidades do elemento estrutural, afim de simular a restrição térmica imposta no experimento. Tal restrição foi feita através de uma mola. Além disso, foi criado outro nó de referência na parte central para captação do deslocamento no meio do vão, como pode ser visto na Fig. 5.

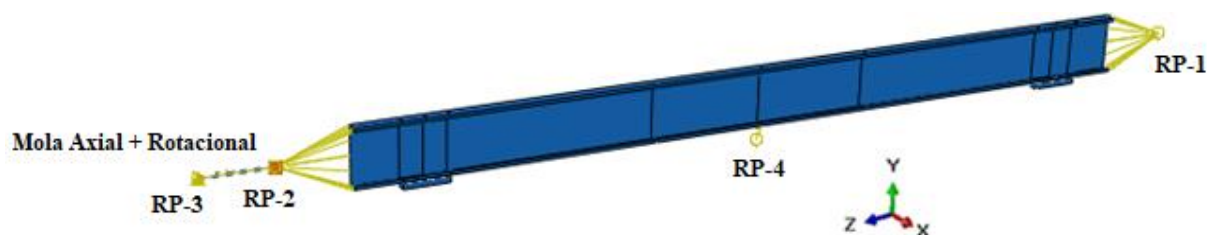


Figura 5. Representação do modelo numérico da viga de aço com restrição térmica, $C_{ka} + kr$

A análise consistiu em dois *steps* que é a forma na qual o ABAQUS associa os passos de uma análise termoestrutural. O primeiro *step* se referiu ao carregamento da viga em temperatura ambiente, feito a partir da inserção do deslocamento correspondente a carga aplicada no ensaio experimental. Nessa etapa, somente os apoios foram responsáveis por suportar o esforço. A viga, ilustrada na Fig.5, é considerada biapoiada, sendo o apoio 1 do segundo gênero (travamento nos eixos X e Y) e o apoio 2 do primeiro gênero (travamento no eixo Y).

O segundo *step* consistiu na etapa de acoplamento entre o campo térmico e estrutural. Portanto, foi necessário importar o campo térmico obtido em uma etapa anterior e alterar as condições de contorno do *step* 1, possibilitando que as restrições térmicas passassem a se manifestar. Assim, houve a participação da mola em uma das extremidades, a partir dos nós RP-2 e RP-3 que restringiam de forma parcial as deformações longitudinais (eixo Z) e as rotações em torno do eixo X e Y, a depender do modelo numérico. O nó RP-1 foi responsável por captar a força de restrição causada pela ação térmica.

4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

4.1 Análise Térmica

Inicialmente serão descritos os resultados da análise térmica. Chama-se a atenção para o fato de que a curva de aquecimento dos três modelos desenvolvidos nesse artigo foram semelhantes, diferindo-se apenas no tempo do ensaio, o que resultou em um campo térmico similar para um mesmo tempo de exposição. Além disso, o perfil C recebeu aquecimento em suas quatro faces e, como sua espessura é constante na seção transversal, a temperatura obtida no modelo numérico foi a mesma para toda a área. Diante disso, será demonstrada a validação do modelo térmico apenas para a viga C_ka + kr e um termopar, pois para as demais vigas e medidores de temperatura o comportamento foi o mesmo.

Seguindo os valores de emissividade e coeficiente de convecção definidos pela ABNT NBR 14323:2013 e pelo EUROCODE 3 Parte 1-2 (2005), definidos no item 3.2, os resultados numéricos térmicos obtidos estão descritos em forma gráfica na Fig. 6, juntamente com a seção transversal com os termopares que mediram a temperatura no ensaio experimental.

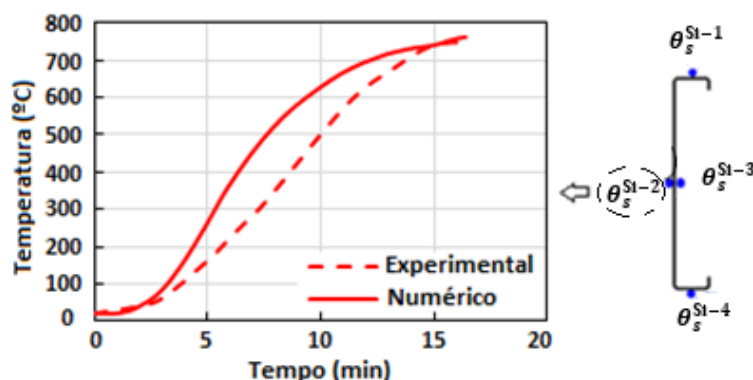


Figura 6. Comparação entre o resultado numérico e experimental para a viga C_ka + kr (Termopar - θ_s^{2-2}) seguindo os parâmetros definidos pela ABNT NBR 14323:2013

A análise gráfica da Fig. 6 permite inferir que, devido ao grande distanciamento entre as curvas apresentadas, o resultado numérico não foi satisfatório. Assim, foi desenvolvida uma análise de sensibilidade dos dois parâmetros mencionados anteriormente, em que a emissividade foi variada de 0,1 a 0,9 e o coeficiente de convecção em 15, 20 e 25 W/m² °C. Na Fig. 7 é apresentado os resultados obtidos dessa análise para os valores de emissividade. Diante do estudo realizado, optou-se por manter o valor do coeficiente de convecção da norma e adotou-se o valor de emissividade resultante para a superfície de aço igual a 0,1.

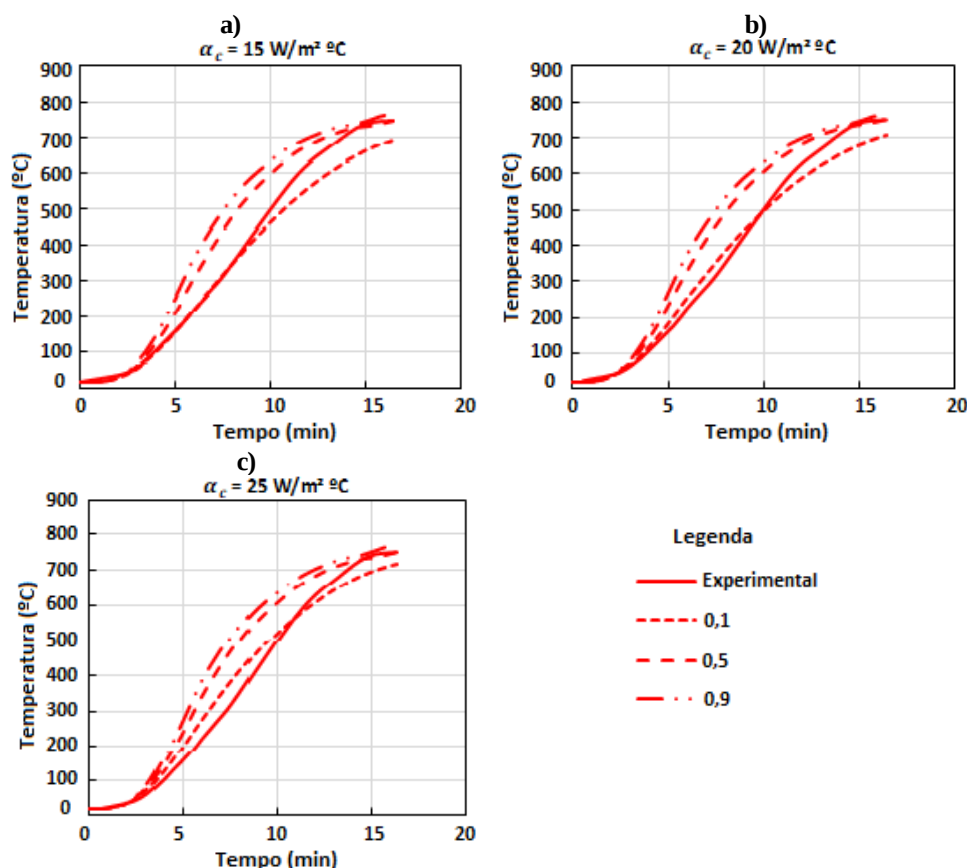


Figura 7 – Análise de sensibilidade para a emissividade e coeficiente de convecção da viga C_ka + kr (Termopar - θ_s^{2-2})

4.2 Análise Estrutural

Na etapa de análise estrutural, o modelo numérico foi validado a partir da comparação entre os resultados numérico e experimentais obtidos para as vigas sem restrição e em temperatura ambiente. Na Fig. 8 é ilustrado a comparação entre os resultados obtidos.

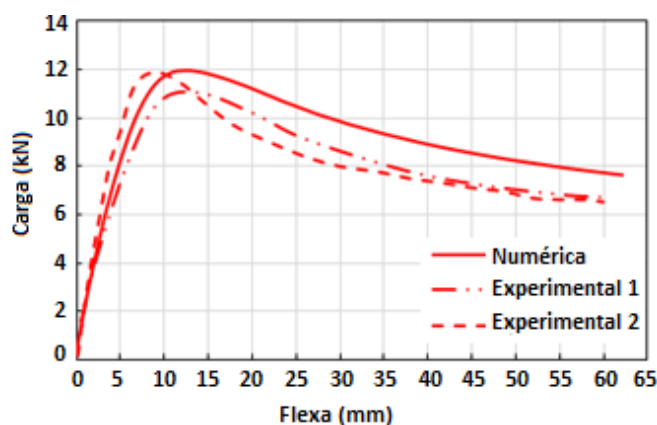


Figura 8 – Comparação entre o resultado numérico e experimentais para a viga C_ em temperatura ambiente

Com base nos resultados, é observado que o modelo numérico é capaz de representar o comportamento mecânico verificado nos ensaios experimentais, tanto em resistência quanto em módulo de elasticidade, uma vez que a curva numérica fica entre as duas curvas experimentais. Em geral, para afirmar que o modelo numérico é capaz de representar o ensaio experimental, além das propriedades mecânicas citadas, é necessário que esse também represente o modo de ruptura verificado experimentalmente. Assim, na Fig. 9 é apresentada a comparação entre a deformada experimental e numérica.

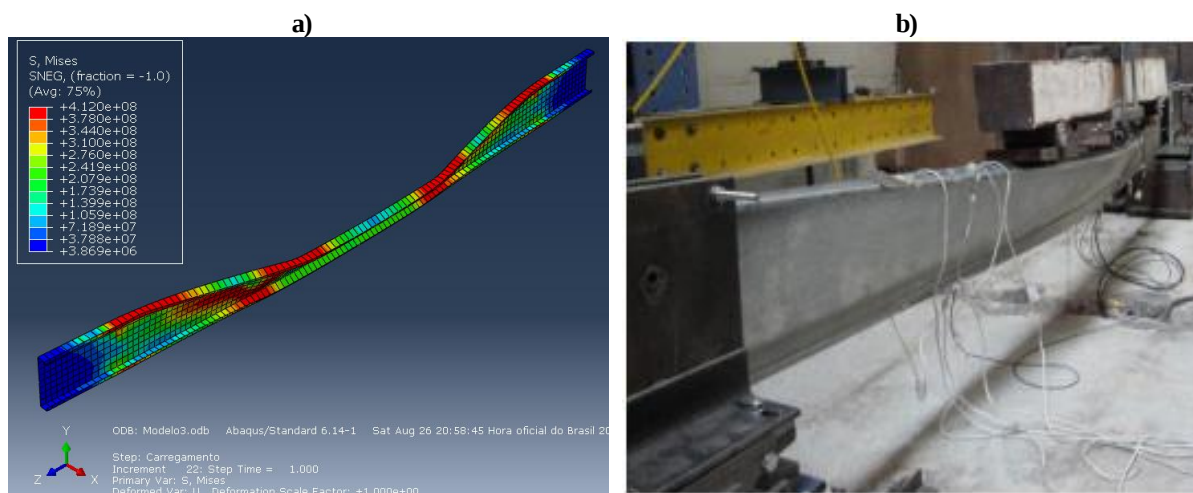


Figura 9 – Comparação entre a deformada numérica e experimental em temperatura ambiente

Como a deformada apresentada pelo modelo numérico é similar a verificada experimentalmente, constata-se que esse é capaz de representar o comportamento real da viga. Logo, validou-se o modelo numérico.

4.3 Análise Termoestrutural

A validação dos modelos termoestruturais consistiu na comparação entre os resultados experimentais e numérico das curvas Flexa no meio do vão *versus* Temperatura e Temperatura *versus* Força de restrição.

Forças de Restrição

Em relação à evolução das forças de restrição, apenas as vigas C_ka e C_ka + kr apresentaram restrição térmica durante os ensaios experimentais, portanto, somente elas desenvolveram forças axiais com o aquecimento. Diante disso, a Fig. 10 traz a comparação entre os resultados numéricos e experimentais para esses elementos estruturais.

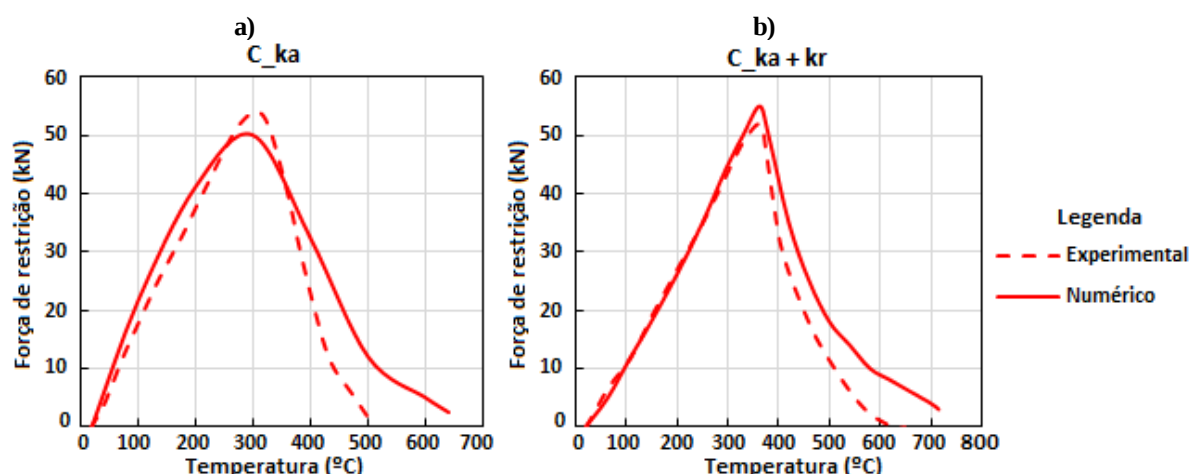


Figura 10 – Evolução das forças de restrição: a) C_ka; b) C_ka+kr.

Na Fig. 10 observa-se a correlação entre as curvas apresentadas. No trecho ascendente, o modelo da viga C_ka + kr conseguiu representar bem o ensaio experimental até a força de pico, enquanto que a viga C_ka apresentou valor, cerca de 10% (5 kN), abaixo do experimental o que não compromete a validação dos resultados. Após o máximo valor de força, iniciou-se o trecho descendente que, por sua vez, o modelo não foi capaz de representar fielmente os experimentos, pois nessa etapa a viga já se encontra plastificada com forte presença de instabilidade local.

Deslocamento do meio do vão

No que concerne ao deslocamento do meio do vão, a validação foi realizada para as três vigas desse estudo, apresentada na Fig. 11. Pode ser observado que o modelo numérico representou bem os deslocamentos na porção central da viga principalmente nos primeiros minutos em que a temperatura foi menor.

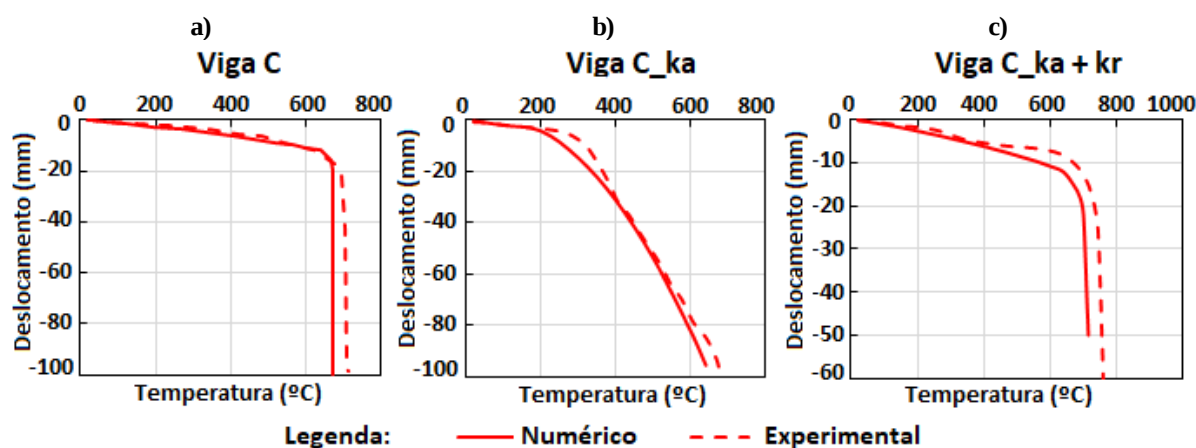


Figura 11 – Evolução dos deslocamentos do meio do vão

Diante do que foi apresentado, pode-se afirmar que o modelo numérico está validado. A partir disso, seguiu-se para a análise paramétrica que será descrita a seguir.

5 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Nesse item, desenvolveu-se uma variação dos parâmetros de rigidez axial e fator de carga aplicado na viga com o objetivo de verificar a influência dos mesmos na resistência ao fogo do elemento estrutural. Para realização da análise paramétrica, foram adotados as grandezas da análise térmica definidos pela norma brasileira, ou seja, emissividade resultante para o aço igual a 0,7 e coeficiente de convecção equivalente a $25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, com o aquecimento dos gases por meio da curva de incêndio padrão ISO 834:1999.

Em relação à rigidez axial, foram feitas análises para os valores 0, 10, 20, 30 kN/mm e rigidez infinita. Para o fator de carga, adotou-se os valores iguais a 25%, 50% e 75% da carga última que equivale a 11,7 kN, aplicando os métodos de cálculo da ABNT NBR 8800:2008 para uma viga de aço formada pelo perfil C.

Vale ressaltar que, em toda a análise a ser descrita adiante, determinou-se o tempo e temperatura críticos para a modelagem numérica a partir do momento em que a força de restrição voltou ao seu valor inicial, ou seja, zero, como definido em Neves (1995). Pode-se afirmar que nesse instante a perda de propriedades mecânicas no aço é tão elevada que o elemento estrutural não apresenta mais capacidade para resistir as forças de restrição.

5.1 Influência do fator de carga

A Fig. 12 traz o comportamento das forças de restrição em função do tempo de exposição para a viga de aço com força de restrição 10 kN/mm, para os três fatores de carga adotados. Ressalta-se que para os demais níveis de restrição axial o comportamento foi semelhante.

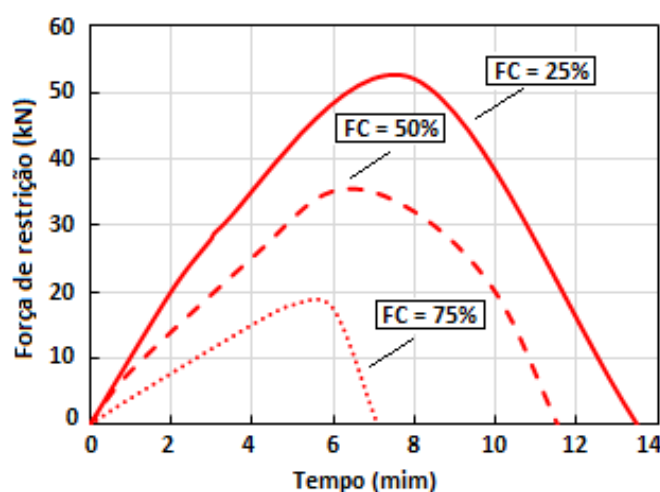


Figura 12 – Influência da variação do fator de carga no desenvolvimento das forças axiais.

A partir da análise gráfica, observa-se inicialmente que quanto maior o fator de carga, menor será o valor atingido da força axial de pico. Além disso, pode-se verificar que os picos atingidos pela força de restrição foram em tempos diferentes, sendo que quanto menor o fator de carga mais tempo foi necessário para alcançá-lo. Isso se justifica pelo fato de que quanto menor a carga aplicada a viga no início do aquecimento, mais força axial será possível absorver e, conseqüentemente, mais tempo para atingir a sua capacidade de carga.

Ao atingir o valor de pico, a viga perde capacidade de resistir as forças axiais até atingir o valor zero que correspondente ao tempo de resistência ao fogo. Diante disso, observa-se que os tempos críticos observados são sempre maiores quanto menor for o fator de carga empregado. Para os níveis de 25%, 50% e 75% da carga última, o instante em que a força voltou ao seu valor inicial foi de 13,5 min, 11,55 min e 7,1 min. No item 5.3, há o resumo dos resultados encontrados para todos os casos.

5.2 Influência do nível de restrição axial

A Fig. 13 mostra a influência da variação da restrição axial no tempo de resistência ao fogo da viga de aço. Inicialmente, observa-se que o elemento estrutural se mostrou mais resistente (maior tempo crítico) quando não apresentou nenhuma restrição térmica em sua extremidade, independente do fator de carga aplicado. Apesar disso, quando houve o aumento desse valor de rigidez de 10 kN/mm para infinito o tempo crítico variou muito pouco, se mantendo quase constante. Admite-se, portanto, que de maneira geral a presença de restrição térmica é muito mais impactante na resistência ao fogo do elemento estrutural do que sua intensidade.

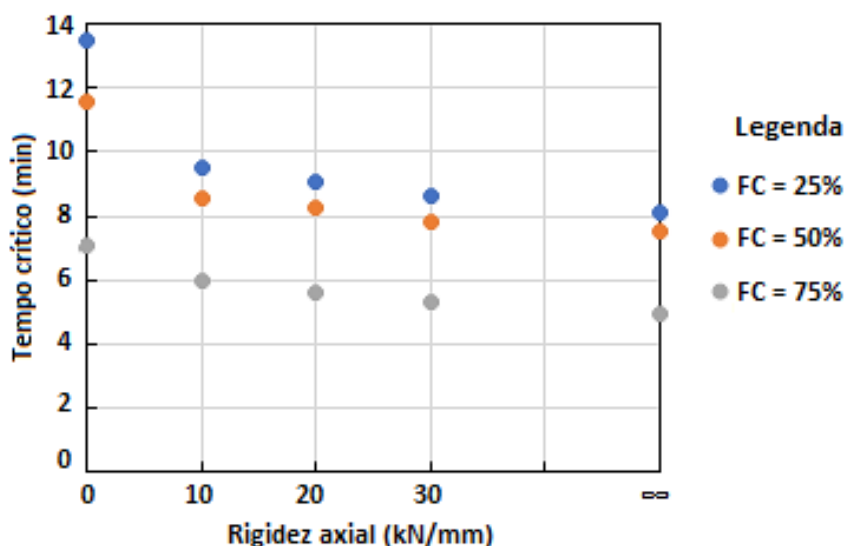


Figura 13– Influência da variação da rigidez axial no tempo crítico

5.3 Resumo dos resultados

De modo a elencar os resultados obtidos nas análises paramétricas realizadas, são apresentadas nas Tabelas 1 e 2 o tempo e a temperatura de resistência ao fogo, respectivamente, em função do fator de carga e rigidez axial.

Tabela 1 – Resumo dos resultados da análise paramétrica para o tempo crítico (min)

Rigidez axial	FC = 25%	FC = 50%	FC = 75%
0	13.50	11.55	7.10
10 kN/mm	9.50	8.60	6.00
20 kN/mm	9.05	8.25	5.65
30 kN/mm	8.65	7.85	5.30
Infinita	8.10	7.55	4.95

Tabela 2 - Resumo dos resultados da análise paramétrica para a temperatura crítica (°C)

Rigidez axial	FC = 25%	FC = 50%	FC = 75%
0 kN/mm	710.49	686.17	590.96
10 kN/mm	652.88	634.72	558.10
20 kN/mm	643.8	626.44	544.42
30 kN/mm	635.73	616.74	527.58
Infinita	622.8	605.47	509.28

6 CONCLUSÃO

Este estudo contou com o desenvolvimento de modelos numéricos de vigas de aço em situação de incêndio. A estratégia numérica adotada conseguiu representar de forma satisfatória o comportamento térmico e termoestructural dos ensaios experimentais possibilitando que uma análise paramétrica fosse realizada para identificar a influência da restrição axial e do fator de carga na resistência ao fogo do elemento estrutural. Observou-se que o fator de carga foi o parâmetro que mais influenciou na resistência, de modo que seu aumento reduziu de forma significativa o tempo e a temperatura críticos. Em relação ao nível de restrição térmica axial, ao aumentar a restrição de 0 para 10 kN/mm, houve uma queda brusca da resistência ao fogo, porém para valores maiores essa redução foi pouco significativa.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS, 2013. *ABAQUS Analysis User's Manual: Volume IV: Elements*. Abaqus.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. *NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. *NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Almeida, S.J.C., 2012. *Análise do comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando restrição ao alongamento térmico*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo. 318p.
- EUROCODE. European Committee for Standardization, 2005. *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General rules - Structural Fire Design*. Brussels: EUROCODE.
- ISO. International Standard, 1999. *ISO 834: Fire-resistance tests - Elements of building construct - Part 1: General requirements*. ISO.
- Laím L., Rodrigues, J.P.C., & Silva, L.S., 2013a. Experimental analysis on cold-formed steel beams subjected to fire. *Thin-Walled Structures*, v. 74, p. 104–117.
- Laím L., Rodrigues, J.P.C., & Silva, L.S., 2013b. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*, v. 72, p.1–13.
- Laím, L., & Rodrigues, J.P.C., 2011. Fire behaviour of cold-formed steel beams for industrial buildings. In: *Proceedings of the 1st Ibero-Latin-American congress on fire safety*, Natal, Brazil, v. 1, p. 53–62.
- Landesmann, A., Silva, F.C.M.D., & Batista, E.M., 2014. Experimental investigation of the mechanical properties of ZAR-345 cold-formed steel at elevated temperatures. *Materials Research*, v. 14, n. 4, p. 1082-1091.
- Neves, I.C., 1995. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*, v. 24, n. 3, p. 211-227.