

PERFORMANCE BASED ANALYSIS OF COLD-FORMED STEEL COLUMNS UNDER FIRE CONDITIONS WITH RESTRAINED THERMAL ELONGATION

Breno de Moraes Dorta¹, Saulo José de Castro Almeida¹, Luiz C. M. Vieira Jr.¹

¹*Department of Structures, School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design, University of Campinas (UNICAMP)*

Avenida Albert Einstein 951, Campinas, SP 13083-852, Brazil

breno.dorta@gmail.com, saulojca@unicamp.br, luizvieirajr@gmail.com

Abstract. In the present paper a performance based approach is developed for assessing the fire resistance of single and built-up cold formed steel (CFS) columns at elevated temperature restrained to thermal elongation subjected to axial compressive loading using finite element models and the Reliability Based Design (RBD). In the first studies Monte Carlo simulation was selected and the analyzed variables were the material's mechanical properties, Young's module (E) and yield stress (fy), and the level of stiffness of the surrounding structure (K). According to the results from the preliminary studies the use of high computational resources would be a limitation. As an alternative to work around this problem the Latin Hypercube Sample (LHS) method was chose. In the sequence of this work the results obtained from the performance based approach was compared to that obtained using the simplify method proposed by the ABNT NBR 14323:2013 to determine the axial compression resistance force of CFS columns in fire situation. Finally, was evaluate among other aspects the probability of failure associated with each method.

Keywords: Fire, reliability analysis, numerical analysis, cold-formed steel.

1 Introdução

Atualmente os códigos normativos Brasileiros de segurança contra incêndio ainda estão fundamentados predominantemente em procedimentos prescritivos com abertura para o uso de abordagens com base no desempenho. Todavia há pouca informação sobre como proceder a avaliação da segurança em situação de incêndio de uma edificação utilizando esta nova filosofia de projeto. Além disso, não há a definição clara e objetiva de critérios quantitativos que permitam avaliar tal desempenho. Conforme ressaltado em Tavares [1], de fato o Brasil apresenta muitas dificuldades para implementação e desenvolvimento de códigos de segurança contra incêndio com base no desempenho, como por exemplo a percepção do risco de incêndio e das leis de segurança contra incêndio. Neste sentido existe um caminho a ser percorrido de modo que códigos de segurança contra incêndio com base no desempenho se tornem uma realidade no Brasil.

No que se refere aos perfis de aço formados a frio, é perceptível a mobilização de pesquisadores para viabilizar a realização do projeto em situação de incêndio de estruturas de aço formado a frio com base no desempenho. Avanços têm sido alcançados na construção de modelos de deflagração e propagação do incêndio, avaliação em temperaturas elevadas das propriedades mecânicas do aço, do comportamento dos elementos (vigas e pilares) e sistemas estruturais (painéis). Conforme destacado em Abreu et al. [2], embora muito trabalho ainda precisa ser realizado, os fundamentos básicos para a realização da análise da resistência ao fogo de sistemas e estruturas de aço formados a frio estão postos de modo que agora é possível realizar o projeto de segurança contra incêndio de estruturas de aço formadas a frio com base no desempenho.

Concernente ao dimensionamento de barras submetidas à força axial de compressão, sabe-se que a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 [3] disponibiliza um método simplificado de cálculo para os elementos de aço formados a frio em situação de incêndio, similar àquele apresentado na norma europeia EN 1993-1-2 [4], o qual considera os efeitos da temperatura na definição das resistências de cálculo por meio de fatores de redução da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade que variam conforme a elevação da temperatura a fim de simular a degradação das propriedades mecânicas do material.

Vários aspectos já foram levantados sobre as limitações deste método simplificado de cálculo apontando necessidade de ajustes. Por exemplo, Almeida [5] resalta que os fatores de redução para o escoamento são os mesmos para perfis pesados e formados a frio, o que segundo Ranawaka and Mahendran [6] é inapropriado dado que a redução da resistência ao escoamento do aço formado a frio é maior que a dos laminados a quente. No que se refere à determinação dos esforços, a norma ABNT NBR 14323:2013 permite que no caso de ser adotada a exposição ao incêndio padrão no dimensionamento os efeitos da expansão térmica das barras sejam desprezados, o que segundo Almeida [5] e Craveiro [7] não é adequado do ponto de vista da determinação dos esforços nas barras dado que a estrutura do entorno exerce certa restrição gerando forças adicionais as quais, podem levar ao colapso prematuro do elemento estrutural e da estrutura.

Entretanto poucos estudos foram realizados para mostrar qual a discrepância entre os resultados das forças de compressão resistente fornecidas pela norma e aqueles obtidos de forma mais realística por meio de testes experimentais ou simulações numéricas que considerem a interação do elemento estrutural com a estrutura circundante. Neste sentido, pouco se pode aferir sobre a segurança contra incêndio proporcionado pela norma no que se refere ao dimensionamento de elementos comprimidos.

Dadas as circunstâncias supracitadas, avaliar a performance dos perfis formados a frio sujeitos a compressão com restrição ao alongamento em situação de incêndio mostra-se de crucial importância, visto que o procedimento normativo Brasileiro que rege o dimensionamento destes perfis pode não estar refletindo a segurança esperada pelo projetista. Em vista do grande número de incertezas envolvidas na avaliação da segurança contra incêndio a análise de confiabilidade é a ferramenta adequada para avaliarmos em termos probabilísticos a performance destes perfis em situação de incêndio obtendo a medida de confiabilidade do sistema em termos de probabilidade de falha (P_f).

Desta forma neste artigo buscou-se avaliar através de um estudo de caso a probabilidade de falha associada a determinação do esforço normal resistente em situação de incêndio de um perfil C enrijecido por meio de métodos avançados de cálculo. Na sequência buscou-se avaliar o método simplificado de dimensionamento da norma ABNT NBR 14323:2013 [3]. O objetivo foi fazer uma comparação entre os resultados fornecidos pelo atual procedimento normativo e aqueles obtidos com base em métodos avançados de cálculo que permitem introduzir efeitos que a norma admite que não sejam considerados. Para efeito de dimensionamento e determinação do TRRF, o perfil foi considerado componente estrutural de uma edificação residencial hipotética e os esforços solicitantes obtidos através de um modelo numérico calibrado conforme resultados experimentais obtidos por Craveiro [7].

2 Análise probabilística de resistência ao fogo

É sabido que a avaliação da segurança estrutural com base no desempenho de um elemento em situação de incêndio envolve três processos, a saber, a simulação do incêndio, a transferência de calor e a análise estrutural. Por

sua vez, conforme lembrado em Guo [8], ao utilizar a análise de confiabilidade para avaliar estruturas em situação de incêndio e calcular a probabilidade de falha é preciso considerar as incertezas relacionadas aos parâmetros que envolvem cada etapa da análise.

No presente trabalho a avaliação da condição de segurança de pilares de aço formados a frio em temperaturas elevadas foi realizada por meio da análise avançada de cálculo e com base no cálculo da probabilidade de falha para diferentes critérios de falha. Para tanto, foram construídos modelos numéricos em elementos finitos utilizando o software Abaqus 6-14. De modo a proporcionar uma análise mais realista, foi considerada nos modelos a restrição axial a expansão térmica. As resistências ao fogo dos pilares foram calculadas considerando módulo de elasticidade (E), tensão de escoamento (f_y) e rigidez da mola (k) como variáveis aleatórias. Foram realizadas 500 simulações de Monte Carlo para cada modelo utilizando o software Matlab sendo utilizado LHS como método de amostragem.

O pilar estudado possui seção tipo C enrijecido com dimensões indicadas na Fig. 1 e cujas propriedades termomecânicas foram obtidas através de ensaios realizados por Craveiro [7]. Foram consideradas duas condições de vinculação nas extremidades, a saber, apoios simples (PP) e semirrígidos (SR).

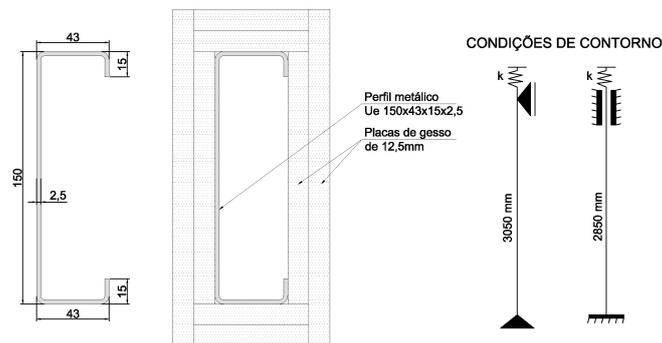


Figure 1. Dimensões do perfil e condições de contorno verificadas.

Conforme estudo realizado por Craveiro [7], com o intuito de simular as restrições impostas a deformação axial de uma edificação residencial de dois pavimentos foram adotados valores de rigidez médios para a mola no topo das colunas com valores de 3kN/mm e 13kN/mm. As propriedades mecânicas, módulo de elasticidade (E) e tensão de escoamento (f_y) foram obtidas experimentalmente por Craveiro [7], sendo seus valores considerados como média nos modelos estocásticos do presente trabalho. As propriedades estatísticas das variáveis aleatórias foram apresentadas na Tab. 1.

Table 1. Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias.

Variável Aleatória	Média (μ)	CV	Distribuição
Módulo de elasticidade (E)	Experimental	5%	Normal
Tensão de escoamento (f_y)	Experimental	8%	Normal
Rigidez da mola (k)	3 kN/mm	5%	Normal
	13 kN/mm	5%	Normal

Foram consideradas imperfeições geométricas iniciais nos valores de $L/1000$ para imperfeição global e $h/200$ para imperfeição local conforme modelos analisados em Craveiro [7]. A temperatura dos gases quentes foi simulada pela curva de incêndio-padrão ISO 834:1999 [9] a qual é adotada pela norma ABNT NBR 14323:2013 [3]. A elevação da temperatura do aço do perfil foi determinada com o procedimento do item 8.5.1.2.2 da ABNT NBR 14323:2013 [3]. A solicitação inicial aplicada (P_0) em cada modelo foi adotada como 50% da força axial de compressão resistente ($N_{c,Rd}$, em temperatura ambiente), calculada conforme procedimento da ABNT NBR 14762:2010 [10].

Para os pilares bi-apoiados o valor de P_0 calculado foi de 11,47 kN e para os perfis com apoios semirrígidos foi de 43,78 kN. Para fins de verificação normativa utilizou-se a norma NBR 14432:2001 [11] para determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) o qual, para edificação residencial com altura menor ou igual a 6,0 m é de 30 minutos. Para que fosse respeitada a prescrição normativa do TRRF foi necessário adotar revestimento de proteção contra o fogo composto por dupla camada de placas de gesso de espessura 12,5 mm envolvendo o perfil conforme indicado na Fig. 1 e cujas propriedades térmicas foram obtidas de Soares and Rodrigues [12], a

saber, massa específica = 800 kg/m^3 , condutividade térmica = $0,20 \text{ W/m}$, calor específico = $1700 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Desataca-se aqui que os pilares investigados no presente trabalho estão dimensionados com base no método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 [3]. A elevação da temperatura do aço foi obtida utilizando equacionamento presente na própria ABNT NBR 14323:2013 [3] para elementos envolvidos por material de revestimento contra o fogo, sendo determinada a temperatura no aço para o TRRF de 30 minutos, aqui denominada θ_{TRRF} , com valor de $319,63^\circ\text{C}$. Os dados de elevação da temperatura no aço calculados por meio da ABNT NBR 14323:2013 [3] foram também utilizados nos modelos numéricos e considerados constantes na seção transversal e ao longo da altura dos pilares.

A verificação da condição de segurança dos pilares em temperaturas elevadas foi realizada em dois domínios. Primeiramente os pilares foram verificados no domínio do esforço. As forças axiais de compressão resistentes de cálculo $N_{fi,Rd}$ calculadas conforme a ABNT NBR 14323:2013 [3] foram de $13,77 \text{ kN}$ para os pilares bi-apoiados e de $45,78 \text{ kN}$ para os pilares com apoios semirrígidos, as quais são maiores que os esforços normais solicitantes de cálculo anteriormente mencionados ($11,47 \text{ kN}$ e $43,78 \text{ kN}$, para os pilares bi-apoiados e com apoios semirrígidos respectivamente), portanto atendendo aos critérios de segurança conforme método de cálculo simplificado da ABNT NBR 14323:2013 [3]. É interessante destacar aqui que as forças axiais solicitantes para as duas condições de apoios foram calculadas desconsiderando os efeitos da expansão térmica, conforme item 8.2.2 da ABNT NBR 14323:2013 [3].

Na sequência os pilares foram também verificados no domínio da temperatura, onde a partir das forças axiais solicitante ($N_{fi,Sd}$) e resistente ($N_{fi,Rd}$) em situação de incêndio foram calculadas as temperaturas críticas (θ_{cr}) para cada condição de apoio e os valores comparados com a temperatura no aço para o TRRF de 30 minutos (θ_{TRRF}). Para o pilar bi-apoiado a temperatura crítica obtida foi $420,65^\circ\text{C}$ e para o pilar com apoio semirrígido foi de $345,17^\circ\text{C}$, estando os dois valores acima da temperatura do aço $319,63^\circ\text{C}$, calculada para o TRRF de 30 minutos. Portanto assim como no domínio do esforço, desconsiderando os efeitos da expansão térmica os perfis estão aprovados segundo o método de cálculo simplificado da ABNT NBR 14323:2013.

3 Resultados

A partir dos modelos numéricos os quais consideram os efeitos da expansão térmica, os pilares foram verificados no domínio da temperatura utilizando dois critérios de falha, conforme descritos na Fig. 2. O primeiro critério caracterizando falha os modelos em que θ_{TRRF} é maior que a temperatura em que o perfil perde estabilidade $\theta_{flambagem}$ e o segundo caracterizando falha os modelos em que θ_{TRRF} é maior que a temperatura em que o perfil não resiste mais a solicitação inicialmente aplicada θ_{falha} . Para cada critério foi calculada a probabilidade de falha associada, designadas por P_{f1} e P_{f1} . Os resultados obtidos em cada simulação foram resumidos na Tab. 2.

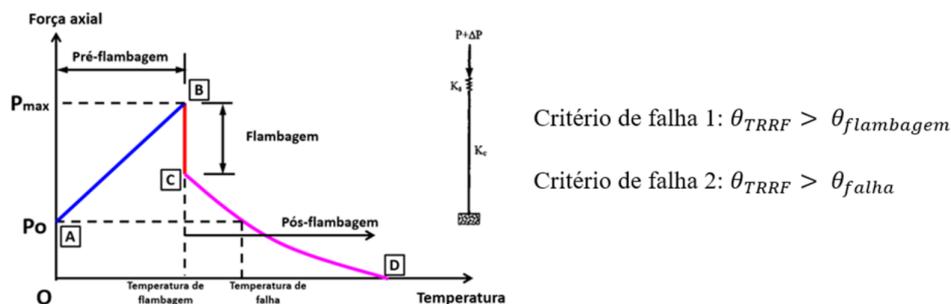


Figure 2. Critérios de falha utilizados para análises de segurança em temperaturas elevadas..

Fonte: Adaptado de Wang [13]

De acordo com os resultados da Tab. 2, caso seja adotado o critério de falha 1, nenhuma das barras investigadas atenderiam as condições de segurança, sejam elas rotuladas ou com apoios semirrígidos em suas extremidades. Em todos os modelos a temperatura no aço θ_{TRRF} foi maior que a temperatura de perda de estabilidade $\theta_{flambagem}$ apresentando probabilidade P_{f1} igual a 100%. Destaca-se aqui que este critério, conforme entendimento dos autores, é o mais coerente com o comportamento de barras submetidas à compressão que apresentam baixa resistência pós-crítica em temperaturas elevadas, situação recorrente em pilares engastados, conforme Fig. 4a e Fig. 4b.

Table 2. Probabilidades de falha.

Condição de Contorno	Rigidez mola	Pf1	Pf2
Bi-apoiado	k = 3kN/mm	100%	3.00%
	k = 13kN/mm	100%	3.60%
Semi-rígido	k = 3kN/mm	100%	99.80%
	k = 13kN/mm	100%	100%

Ainda de acordo com os resultados da tabela 2, para os pilares bi-apoiados, conforme Pf2, de 3,0% a 3,6% dos casos apresentaram temperatura θ_{falha} menor que θ_{TRRF} , indicando que menos de 5,0% dos modelos falhariam para esta condição. No entanto, para os pilares com apoios semirrígidos mais de 95% dos casos apresentariam falha. Neste sentido, o critério de falha 2 sugere ser aplicável aos pilares de aço com extremidades rotuladas. Em todo caso, ainda há uma probabilidade de falha cuja aceitabilidade necessita ser melhor avaliada e investigada para outros casos. Não obstante, é preciso atentar que para alguns casos a adoção do critério de falha 2 pode implicar no surgimento de efeitos dinâmicos cuja influência no comportamento global da estrutura necessita ser avaliada.

As figuras Fig. 3a e Fig. 3b apresentam o avanço do esforço axial solicitante com a temperatura com o esforço axial para todos os modelos bi-apoiados, bem como as fronteiras estabelecidas por θ_{TRRF} , θ_{cr} , P_0 e $N_{fi,Rd}$. De acordo com as figuras Fig. 3a e Fig. 3b verifica-se que utilizando o método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013, as forças axiais resistentes em situação de incêndio $N_{fi,Rd}$ são superadas com temperaturas inferiores a 75 °C, ou seja, para temperaturas muito baixas e pouco racional do ponto de vista de situações reais de incêndio. O entendimento dos autores é que esta situação é primordialmente decorrente do modelo utilizado pela norma que não considera a influência da expansão térmica para definir a força axial de compressão resistente em temperaturas elevadas. Neste sentido, destaca-se aqui que os projetistas devem ter cuidado quando optarem por fazer a verificação de barras comprimidas por meio de análises avançadas associada com a resistência definida por norma.

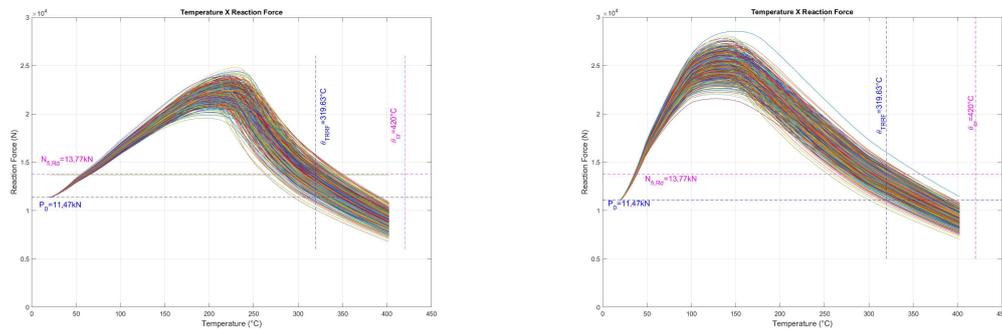


Figure 3. Relação força axial vs. Temperatura para os pilares bi-apoiados.

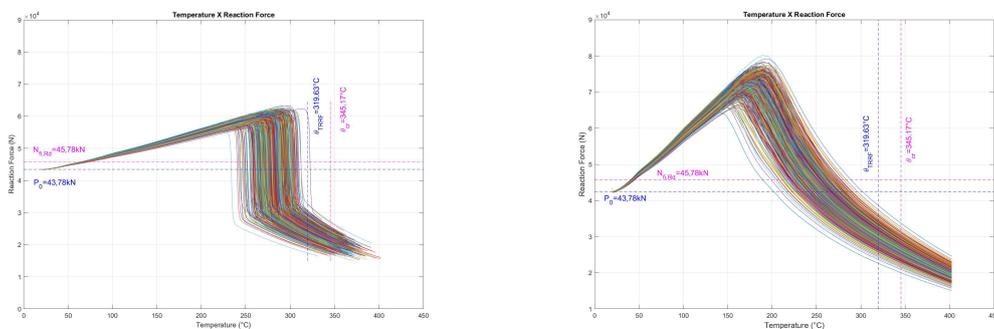


Figure 4. Relação força axial vs. Temperatura para os pilares com apoios semirrígidos.

De acordo com os resultados, tanto para pilares bi-rotulados ou com apoios semirrígidos, fica evidente que o uso da prerrogativa de considerar ou não os efeitos das restrições a expansão térmica na determinação dos esforços

solicitantes ao se adotar o método o de cálculo simplificado na ABNT NBR 14323:2013 [3] deve ser avaliado de forma criteriosa.

4 Conclusões

O presente trabalho apresentou os resultados da análise comparativa entre os dimensionamentos de elementos de aço formados a frio comprimidos em temperaturas elevadas com base no desempenho e com base no método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013. Por meio de um modelo de cálculo avançado devidamente calibrado um total de 2000 simulações foram realizadas e as resistências ao fogo dos elementos foram calculadas. De acordo com os resultados obtidos as seguintes conclusões podem ser apontadas:

- Há necessidade de melhor se avaliar a aplicabilidade do método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013 para o cálculo da força de compressão resistente de elementos de aço formados a frio em temperaturas elevadas.
- O uso da prerrogativa de considerar ou não os efeitos das restrições a expansão térmica na determinação dos esforços solicitantes ao se adotar o método o de cálculo simplificado na ABNT NBR 14323:2013 deve ser avaliado de forma criteriosa.
- Há necessidade de maiores discussões sobre o uso de métodos avançados de cálculo para a verificação das condições de segurança de pilares de aço formados a frio em temperaturas elevadas, de modo que a mesma seja usada de forma segura para realizar a análise de segurança com base no desempenho.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Departamento de Estruturas da FEC/UNICAMP, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

References

- [1] Tavares, R. M., 2009. An analysis of the fire safety codes in brazil: Is the performance-based approach the best practice? *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 749–755.
- [2] Abreu, J. C. B., Jr, L. M. C. V., Abu-Hamd, M. H., & Schafer, B. W., 2014. Review: development of performance-based fire design for cold-formed steel. *Fire Science Reviews*, pp. 15.
- [3] NBR 14323:2013, 2013. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Standard, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [4] EN 1993-1-2, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-2: General rules - structural fire design. Standard, (CEN) EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.
- [5] Almeida, S. J. C., 2012. *Análise do comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando restrição ao alongamento térmico*. PhD thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- [6] Ranawaka, T. & Mahendran, M., 2009. Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures. *Fire safety journal*, vol. 44, n. 2, pp. 219–229.
- [7] Craveiro, H. D. S., 2015. *Fire Resistance of Cold-Formed Steel Columns*. PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- [8] Guo, Q., 2015. *Structural Reliability Assessment under Fire*. PhD thesis, University of Michigan.
- [9] ISO 834:1999, 1999. Fire-resistance tests — elements of building construction — part 1: general requirements. Standard, International Organization for Standardization.
- [10] NBR 14762:2010, 2010. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Standard, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [11] NBR 14432:2001, 2008. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimento. Standard, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [12] Soares, C. H. & Rodrigues, F. C., 2002. Dimensionamento de perfis de aço formados a frio em situação de incêndio. *CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONSTRUÇÃO METÁLICA*, vol. 2.
- [13] Wang, Y., 2002. *Steel and composite structures: behaviour and design for fire safety*. Taylor & Francis Group Ltd.