Comportamento estrutural de pilares de aço formados a frio em situação de incêndio – análise numérica

Renato Guilherme da Silva Pereira^{1*}; Hildo Augusto Santiago Filho²; Roberto Melo Cunha Filho³; Fernando Artur Nogueira Silva⁴; Tiago Ancelmo Pires⁵

¹ Professor Mestre, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade ESTÁCIO Recife, renatoguilherme3@gmail.com

² Professor Mestre, Departamento de Engenharia Civil da FACOL, hildo_a_santiago@hotmail.com

³ Especialista, Universidade de Pernambuco, robertomelo.compesa@gmail.com.br

⁴ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil da UNICAP, artur.nogueira@unicap.br

⁵ Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil da UFPE, tacpires@yahoo.com.br

Structural behavior of cold-formed steel columns in fire – numerical analysis

Resumo

Buscando compreender o efeito do incêndio e avaliar as consequências causadas em pilares de aço formado a frio, sem e com revestimento contra fogo, tendo em vista que as propriedades mecânicas dos materiais regridem progressivamente com o incremento elevado da temperatura, este trabalho traz o resultado de análises termomecânicas realizadas com o Método dos Elementos Finitos (MEF), através do software ABAQUS. Os Perfis modelados numericamente apresentam seções transversais do tipo Σ e 2Σ , e foram submetidos a curva do forno do ensaio experimental feito por Mota (2016) e ao incêndio-padrão da ISO-834, para os casos de pilares sem e com proteção, respectivamente.

Palavras-chave: Pilares, Aço formado a frio, Incêndio, Revestimento contra fogo, Análise numérica.

Abstract

Seeking to understand the effect of the fire and to evaluate the consequences caused in columns of cold formed steel, without and with coating against fire, considering that the mechanical properties of the materials progressively regress with the high temperature increase, this work brings the result of analyzes thermomechanical tests performed with the Finite Element Method (FEM), using ABAQUS software. The numerically shaped profiles present cross-sections of type Σ and 2Σ , and were submitted to the furnace curve of the experimental test made by Mota (2016) and ISO-834 standard fire, respectively.

Keywords: Columns, Cold formed steel, Fire, Coating against fire, Numerical analysis.

* autor correspondente

1 Introdução

A indústria da construção tem evoluído no âmbito de desenvolver soluções construtivas que sendo mais econômicas e sustentáveis, garantam igual ou melhor desempenho estrutural. Nesse sentido, verificou-se nos últimos anos o uso crescente de elementos de Aço Formado a Frio (AFF). Estes diferem das seções laminadas a quente essencialmente pelo seu processo de fabricação e pela espessura associada aos perfis, sendo que os elementos em AFF apresentam espessuras mais reduzidas. A sua crescente procura foi motivada pelas vantagens que apresentam quando comparado a outros materiais como o concreto armado, a madeira ou mesmo o aço laminado a quente. Equiparado aos vários materiais disponíveis na indústria, o aço formado a frio destaca-se pela sua elevada leveza estrutural, que associada à sua capacidade resistente o torna bastante competitivo dentro do setor da construção.

O comportamento ao fogo deste tipo de elemento caracteriza-se pela degradação das propriedades mecânicas do aço em função do aumento de temperatura, fazendo com que estas, apresentem diferenças significativas para altas temperaturas (Craveiro et al., 2016). As propriedades mecânicas mais afetadas com o aumento de temperatura são a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço (Ranawaka e Mahendran, 2009; Kankanamge e Mahendran, 2011, Craveiro et al., 2016). A degradação dessas propriedades influencia a força crítica de flambagem dos elementos, podendo levar ao seu escoamento antecipado. Na região das dobras, o aumento de temperatura leva também a redução da sua rigidez, pelo que a adição de reforços poderá não ser benéfica na resposta estrutural dos elementos (RODRIGUES, et al., 2014). Neste caso, torna-se importante o conhecimento da taxa de degradação das propriedades mecânicas do aço quando submetido a temperaturas elevadas. Para realização de modelações numéricas, de modo a obter modelos capazes de reproduzir situações reais de incêndio, é importante fazer uma correta caracterização destas propriedades mecânicas. Para isto, a ABNT NBR 14323:2013 e EN 1993-1-2 (2005) permite a aplicação de fatores de redução para as propriedades mecânicas, de modo a ter a sua degradação considerada.

A utilização de algum tipo de proteção produzida através de revestimentos contra fogo é uma das soluções mais comuns para o aumento da resistência ao fogo para este tipo

de aço. Estudos sobre o tema ainda são escassos, apesar de alguns trabalhos como Silva (2005) e Gerkeen (2007) abordarem este assunto. Para determinação das temperaturas desenvolvidas no perfil com proteção em situação de incêndio, as normas, Europeia EN 1993-1-2 (2005) e Brasileira ABNT NBR 14323:2013, que definem as orientações para o projeto de estruturas de aço em situação de incêndio, trazem um método simplificado, porém não definem as características térmicas dos materiais de proteção, dificultando a determinação das espessuras para projetos de estruturas de aço em situação de incêndio e recomendando normas de ensaio para obtenção destas.

Costa (2013) realizou um estudo experimental onde ensaiou 10 exemplares de pilares tubulares de aço formados a frio do tipo caixão, com e sem restrição axial em situação de incêndio, aquecidos em um forno elétrico capaz de reproduzir a curva de incêndio-padrão da ISO-834 (1999). Os Tempos Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) segundo critérios fornecidos pela ISO-834 variaram entre 9 e 3 min., onde os pilares foram carregados axialmente com 40 e 80% de sua capacidade resistente na situação ambiente. O autor concluiu que a restrição axial à dilatação térmica e o aumento do nível de carregamento reduzem o tempo de falha dos pilares, cujo máximo foi de 9 min., alcançado por um pilar carregado com 40% da resistência à compressão e sem restrição à dilatação térmica.

Conforme resultados obtidos por Costa (2013), apresentados no parágrafo anterior, mostram que pilares de aço composto por chapas finas formadas a frio possuem uma pequena resistência ao fogo, entretanto constata-se grande escassez na literatura de trabalhos envolvendo revestimento contra fogo desse tipo de estrutura.

Desta forma, pretende-se contribuir com o entendimento do comportamento de pilares de aço com e sem revestimento contra fogo através dos seguintes objetivos:

- Desenvolver de um modelo computacional tridimensional em elementos finitos (elementos sólidos), não linear, para análise do comportamento de pilares de AFF em situação de incêndio com o software ABAQUS;
- Validar o modelo numérico (pilar sem proteção) através da comparação com os resultados experimentais obtidos por Mota (2016);

- Determinar a resistência ao fogo de pilares de aço com revestimento contra fogo tipo caixa de placas de concreto com espessuras de 10, 20 e 30 mm, quando submetido à curva de aquecimento da ISO-834;
- Comparar os resultados numéricos obtidos com o método simplificado da ABNT NBR 14323:2013.

2 Análise Numérica

2.1 Propriedades geométricas dos pilares

Neste trabalho a modelagem numérica dos pilares de aço formado a frio submetido à compressão axial, foi feita com o programa ABAQUS (versão 6.13-1), programa que tem como base de sua rotina o Método dos Elementos Finitos (MEF), através da técnica de integração implícita (ABAQUS/Standard). Os pilares de AFF analisados apresentavam dois tipos de seção transversal, sendo elas denominadas de seção sigma (Σ) e dois sigma (2Σ), da classe estrutural S320GD+Z275. Estes pilares foram modelados admitindo as mesmas características do experimento realizado por Mota (2016), ou seja, as seções Σ apresentam 255 mm de altura, 70 mm de largura, e 2,5 mm de espessura, conforme Figura 1. A Figura 2 apresenta uma vista ao longo do pilar, com 2,95 m de comprimento do elemento, onde à direita são mostradas as posições dos termopares, assim como os TF (transdutores de fio) utilizados para o registro dos deslocamentos laterais.

Figura 1 - Seção transversal. (medidas em mm). Mota (2016)

Figura 2 - Vista ao longo da altura dos pilares. Mota (2016)

2.2 Tipo de elemento finito

O ABAQUS dispõe de uma variedade de elementos finitos em sua biblioteca, sendo eles de diferentes tipos como Sólidos, SHELL, Membrane, Frame, entre outros, SANTIAGO (2018). Neste estudo numérico, na análise térmica, para discretização dos respectivos pilares, utilizou-se um elemento sólido DC3D8, sendo o mesmo contínuo e 3D, de formação linear e composto por 8 nós. Já para análise mecânica foi adotado o elemento C3D8R, elemento do tipo sólido, utilizado na discretização dos perfis, dos parafusos, assim como na chapa no topo e na base dos pilares. O elemento C3D8R, representado na Figura 3, conforme biblioteca do ABAQUS, trata-se de um elemento contínuo (C), tridimensional (3D), com oito nós (8) e integração reduzida (R). Apresenta formação linear e três graus de liberdade de translação em cada nó.

Figura 3 - Esquema do elemento finito C3D8R. Laím et al. (2011)

2.3 Malha de elementos finitos

Os pilares de aço formado a frio foram discretizados em malhas de 10 x 10 x 10 mm, para o perfil Σ e 15 x 15 x 15 mm para 2Σ . A malha dos pilares 2Σ teve suas dimensões aumentadas em relação ao perfil de seção Σ , para que o tempo de processamento de cálculo do mesmo não aumentasse, tendo em vista que após estudo de refinamento de malhas, constatou-se que não haveria melhoria significativa nos resultados da análise. Já para os parafusos foi adotada uma malha com a dimensão de 2 x 2 x 2 mm. Portanto para cada pilar Σ e 2Σ (sem proteção) foram gerados aproximadamente 41914 e 22648 elementos, conectados entre si por 49020 e 33615 nós, respectivamente. Já para o pilar Σ e 2Σ (com proteção) foram gerados aproximadamente 110920 e 43143, conectados entre si por 133792 e 68310 nós, respectivamente. Enfim, a malha gerada para os parafusos, os subdividiu em 162 elementos interligados a 253 nós. Na Figura 4 é apresentada a discretização da malha de elementos finitos nos perfis Σ e 2Σ , e no parafuso.

Figura 4 – Malha de elementos finitos (a) Perfil Σ (sem proteção), (b) Perfil 2Σ (com proteção) e (c) parafuso.

2.4 Propriedades do material

Para o modelo em estudo foi adotado que o material tem comportamento não linear e isotrópico, e superfície de escoamento de von Mises.

Quando se considera que a estrutura sofrerá deformações finitas, na curva tensão x, deformação deve ser considerada as tensões e deformações calculadas com base na geometria real da estrutura deformada. As tensões (σ) e deformações (ϵ) reais são dadas por:

$$\epsilon = \ln (\epsilon_{nom} + 1) \quad (\text{Equação 1})$$

$$\sigma = \sigma_{nom} \cdot (1 + \epsilon_{nom}) \quad (\text{Equação 2})$$

No ABAQUS o comportamento plástico do material é considerado e definido por essas medidas, com a tensão real relacionado à parcela plástica da deformação real, PEREIRA (2018).

Essas seções foram fabricadas a partir de chapas de aço estruturais S320GD + Z275 (com resistência nominal de 320 MPa, e resistência à tração de 390 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa, pré-galvanizado com uma espessura padrão de revestimento de zinco de 0,04 mm (275 g / m²) por laminação a frio.

Com objetivo de considerar as degradações mecânicas dos materiais submetido à temperatura elevadas foram aplicados a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade os fatores de minoração de suas propriedades estabelecidos no EN3 parte 1-2. As curvas tensão-deformação do aço S320 são apresentadas na Figura 5, para várias temperaturas.

O coeficiente de Poisson e peso específico do aço foram considerados com os valores constantes de 0,3 e 7850 kg/m³, respectivamente, e foram desprezadas as tensões residuais do material.

Figura 5 - Diagrama tensão real x deformação real para o aço S320.

2.5 Condições de Contorno, Carregamento e Contato.

As condições de contorno foram aplicadas sobre as placas modeladas na base e no topo do elemento, que tinha como objetivo evitar a concentração de esforços na alma do elemento. Para o modelo utilizado na validação (pilar sem proteção), foi aplicada na chapa superior ainda uma restrição axial de aproximadamente 30 kN/mm, assim como restringido os demais graus de liberdade de translação dos nós localizados da linha média, na face externa de cada chapa, em que se buscou simular a condição de um pilar birrotulado, conforme Figura 4(a). Já para o pilar com revestimento contra fogo tipo caixa, Figura 4(b), na chapa superior foi restringido todos os graus de liberdade de translação, com exceção da direção vertical, e na chapa inferior foram restringidos todos os graus de liberdade de translação (restrição aplicada na linha média da face externa da chapa).

Foi aplicado um carregamento axial conforme experimento, correspondente a 50 % de $N_{b,Rd}$, que é a força axial resistente de cálculo à temperatura ambiente, calculada de acordo com o EN 3, partes 1.1, 1.3 e 1.5, onde o valor de $N_{b,Rd}$ varia de acordo com as condições de contorno, propriedades geométricas da seção transversal e comprimento do elemento. Essa força foi intitulada como (P_0), simulando uma força de serviço. Esta foi aplicada no centro da chapa que estava no topo do pilar.

Para simular a ação térmica no modelo foram utilizados dois tipos de superfícies ao redor dos pilares sem revestimento (PSR) e ao redor do revestimento contra fogo dos pilares protegidos (PP), denominadas *filmcondition* e *radiation*, que representam os fenômenos de convecção e radiação, respectivamente, com uma emissividade resultante do perfil de aço de 0,3, devido à superfície espelhante dos perfis de aço formado a frio, adquirida pelo revestimento de zinco. Para os PSR foi utilizada a curva de aquecimento do forno de Mota (2016), já para os PP aplicou-se a curva do incêndio-padrão ISO-834. As propriedades térmicas adotadas no modelo numérico para o concreto de proteção foram a densidade, a condutividade e o calor específico, calculadas de acordo com as expressões da ABNT NBR 15200:2012, e emissividade adotada de 0,95. As espessuras analisadas do revestimento contra fogo, em placas de concreto pré-moldado, foram de 10, 20 e 30 mm. Este intervalo de valores contempla as espessuras comercialmente utilizadas para proteção de estruturas.

Considerou-se que:

- As propriedades térmicas da proteção variavam de acordo com a temperatura ao longo do aquecimento;
- Entre a proteção e o perfil de aço não há perda de calor, mesma consideração feita pela ABNT NBR 14323:2013.

Para o coeficiente de transferência de calor por convecção foi adotado para efeitos práticos, o valor de 25 W/m^2 .

O contato entre as superfícies do perfil 2Σ, assim como o revestimento de proteção e o perfil, foi modelado com comportamento " TIE " simulando assim o contato perfeito, para que não houvesse perda de calor e fosse feita a transferência de temperatura por condução do aço.

2.6 Métodos de análise

A análise numérica no ABAQUS foi realizada em duas fases, sendo primeira a térmica onde se obteve o desenvolvimento das temperaturas dos pilares ao longo do tempo, quando submetido a taxa de aquecimento da curva do incêndio-padrão ISO-834 (pilares com proteção) e a curva da temperatura do forno de Mota (2016) (pilares sem proteção). Em seguida foi feita a análise mecânica submetida a força axial, e a ação térmica feita na fase anterior, com o parâmetro de não linearidade geométrica ativado, para que fosse considerado o efeito de grandes deslocamentos. Esse tipo de análise realizada em mais de uma fase é denominado de análise sequencial (Thermal-MechanicalAnalysis), cujo objetivo principal é reduzir o tempo computacional de processamento, e produz resultados semelhantes aos obtidos na análise acoplada (CoupledThermal-MechanicalAnalysis), ROCHA (2014).

2.7 Comparação entre os resultados numéricos, experimentais e método simplificado (MS).

2.7.1 Pilar de aço sem revestimento contra fogo

Nas Figuras 6(a) e 6(b) são realizadas comparações da temperatura média na seção 3 dos pilares ensaiados de forma experimental, assim como os resultados da análise numérica e do método simplificado (MS) da ABNT NBR 14323:2013. Já na Figura 7, é analisada a temperatura média de toda coluna. Como pode ser visto todas as curvas numéricas apresentaram comportamento idêntico aos obtidos experimentalmente.

Em relação à curva do MS nas Figuras 6 (a) e (b), aproximadamente a partir do instante 5,5 minutos, apresentam temperaturas acima do valor das curvas numérica e experimental nos mesmos instantes, mantendo-se a favor da segurança, sendo assim aceitável o resultado.

Figura 6 - Evolução da temperatura média na seção S3 no perfil Σ (a) e 2Σ (b)

Figura 7 - Evolução da temperatura média no pilar.

A Figura 8 mostra a evolução dos deslocamentos laterais no pilar de aço formado a frio, em função do tempo de incêndio e altura.

Os deslocamentos laterais foram medidos na análise do perfil Σ nos tempos 0, 2, 4 e 5,88 minutos. Já para o perfil 2Σ os tempos foram 0, 2, 4, 6 e 6,37 minutos. Assim como no resultado da análise térmica, os resultados mecânicos numéricos também apresentaram comportamentos semelhantes aos obtidos no modelo experimental.

(a)

(b)

Figura 8. Deslocamento lateral na direção do eixo de menor inércia: (a) Σ e (b) 2Σ

Em seguida é apresentada na Figura 9 a comparação da evolução das forças de restrição, pelo diagrama P/P_0 , tendo em vista que foi considerada uma restrição axial de 30 kN/mm, como citado na seção 2.5 deste artigo, na análise experimental e numérica, e a partir de seu resultado é definida a falha no pilar que ocorre quando a força resistente, após sofrer um acréscimo, retorna ao seu valor inicial.

Figura 9. Comparação do resultado experimental e numérico, relação P/P_0 .

Observa-se que a temperatura crítica (θ_{cri}), temperatura a partir da qual o pilar deixa de apresentar capacidade resistente ao carregamento solicitado, assim como o tempo crítico (t_{cri}), instante de tempo em que ocorre a temperatura crítica, para ambas as seções na análise numérica apresentaram resultados semelhantes aos obtidos no modelo experimental, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre resultados experimentais e numéricos.

Seção	t_{cri} - Exp (min)	t_{cri} - Num (min)	θ_{cri} - Exp ($^{\circ}\text{C}$)	θ_{cri} - Num ($^{\circ}\text{C}$)	% Erro - t_{cri}
Σ	5,88	5,52	264,05	237,5	6%
2Σ	6,37	6,72	190,13	200	5%

Os resultados numéricos e experimentais foram semelhantes, portanto pode-se afirmar que o modelo numérico é válido, prevendo assim o comportamento térmico e mecânico de pilares de aço formado a frio carregados axialmente e com restrição à dilatação térmica. De um modo geral, o modelo numérico pode ser utilizado para prever o comportamento de pilares de aço formado a frio, e com boa precisão.

2.7.2 Pilar de aço com revestimento contra fogo

Nesta seção, é apresentado o resultado da análise do comportamento em situação de incêndio dos pilares de aço formados a frio com revestimento contra fogo tipo caixa de placas de concreto pré-moldado. O concreto moldado “in loco” (e também o concreto pré-moldado) tem sido utilizado como proteção antitérmica desde os primórdios da construção em aço (FREITAG, 1899). Elas oferecem uma solução esteticamente adequada a grande número de situações e a um custo relativamente pequeno (SILVA et al., 2008). O Pilar foi aquecido em todo seu comprimento, conforme a curva de incêndio-padrão da ISO-834, onde foi feita uma comparação entre o modelo numérico e o método simplificado da ABNT NBR 14323:2013.

Nas Figuras 10(a) e 10(b) são apresentadas comparações da média da evolução das temperaturas na seção S3 do pilar, obtidas pelo modelo numérico e pelo (MS) ABNT NBR 14323:2013.

(a)

(b)

Figura 10 - Evolução da temperatura média na seção s3 no perfil Σ (a) e 2Σ (b)

Observa-se que, para ambos os perfis, o desenvolvimento da temperatura no aço tende a divergir com o aumento do tempo de exposição ao fogo do material de proteção, apresentando o valor mais acentuado para o MS, mostrando que o mesmo é conservador para representar a evolução das temperaturas dos perfis de aço com revestimento contra fogo tipo caixa submetido ao incêndio.

Na figura 11 é mostrada a evolução do deslocamento axial no topo dos pilares de AFF com revestimento contra fogo para os dois tipos de perfis em estudo.

(a)

(b)

Figura 11 - Deslocamento axial no topo do pilar do modelo numérico, para diferentes espessuras de proteção Σ (a) e 2Σ (b)

A análise do resultado mecânico, obtido pelo modelo numérico, permite facilmente a determinação da resistência ao fogo dos pilares através dos critérios de falha da ISO-834, ou seja, o pilar falha quando o deslocamento axial atinge o valor de $L/100$ ou a taxa de deslocamento axial atinge o valor de $3L/1000$, onde L é o comprimento inicial do pilar, em milímetros.

Nesta análise, o modelo numérico apresentou resultados já esperados, como:

- Maior tempo de resistência ao fogo (TRF) para o perfil 2Σ em comparação com o perfil Σ , tendo em vista possuir um menor fator de massividade;
- A resistência ao fogo tende a crescer consideravelmente com o aumento da espessura do revestimento contra fogo.

Os valores do tempo de resistência ao fogo para o MS e o método avançado (modelo numérico), são apresentados na Tabela 2, de acordo com a espessura do revestimento contra fogo adotada e o tipo de seção.

Tabela 2 – Tempo de resistência ao fogo dos pilares com revestimento contra fogo.

Pilar	Σ		2Σ	
	MS (min.)	Numérico (min.)	MS (min.)	Numérico (min.)
Revestimento de 10 mm	13,5	22	16,5	40
Revestimento de 20 mm	26,5	33	30	54
Revestimento de 30 mm	38	47,5	41	74

3 Conclusões

O artigo apresentou um modelo numérico, para análise de pilares de aço formado a frio em situação de incêndio, sem e com revestimento contra fogo, desenvolvido com base no método dos elementos finitos, utilizando elementos do tipo sólido e aproximação linear. Seus resultados foram validados através da comparação das análises térmicas, deslocamentos laterais e evolução das forças de restrição, com os resultados obtidos experimentalmente por Mota (2016). Após a validação do modelo sem revestimento, foi apresentada uma comparação do modelo numérico com revestimento contra fogo em placas de concreto pré-moldado e o MS na ABNT NBR 14323:2013, para a evolução das temperaturas e deslocamento axial no topo do pilar,

quando o perfil é submetido a temperatura elevadas. Diferentes tipos de espessuras de revestimento contra fogo tipo caixa (10, 20 e 30 mm) foram analisadas.

A partir dos resultados das análises realizadas, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- Como a concordância entre os resultados numéricos e experimentais foram semelhantes, pode-se afirmar que o modelo numérico é válido e com boa precisão, prevendo assim o comportamento térmico e mecânico de pilares formado a frio carregados axialmente com/sem restrição à dilatação térmica, em situação de incêndio.
- O método simplificado da ABNT NBR 14323:2013 mostrou-se conservador quanto ao TRF dos perfis 2Σ de aço formado a frio com revestimento contra fogo.
- Tanto a revestimento contra fogo do perfil Σ , quanto para o 2Σ aumentaram consideravelmente o tempo de resistência ao fogo dos pilares. Nos casos analisados para o perfil Σ , a cada 10 mm acrescido na espessura, aproximadamente aumenta-se 1,5 vezes o tempo de resistência ao fogo. Já para o perfil 2Σ esse coeficiente passou a ser aproximadamente 1,35.

Tendo do em vista a validade do modelo numérico, o mesmo pode ser utilizado para futuras análises paramétricas, alterando a força aplicada, a altura e os tipos de rotulação, por exemplo, não necessitando recorrer a ensaios experimentais.

Análises numéricas adicionais estão sendo conduzidas em vigas de aço formado a frio em situação de incêndio para se formular um entendimento racional, e da mesma forma como apresentado neste trabalho comparar com o método simplificado de cálculo da ABNT NBR 14323:2013.

4 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-14762: **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-14323: **Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, L.M. **Análise experimental de pilares de aço formado a frio sob altas temperaturas com dilatação térmica livre e restringida**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CRAVEIRO, H., RODRIGUES, J. P. C., SANTIAGO, A., E LAÍM, L.. **“Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold formed steel structures – The case of the S280 GD+Z steel”**. Thin-Walled Structures, Vol. 98, pp. 154–168, 2016.

EN 1993-1-1. Eurocode 3: **Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**”. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelas, 2005.

EN 1993-1-3. **“Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”**. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelas, 2006.

EN 1993-1-5. **“Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements”**. CEN – European Committee for Standardization, Bruxelas, 2006.

FREITAG, J. K. **The Fireproofing of Steel Structures**. 1st Edition, John Wiley & Sons, 1899.

GERKEEN, A.L.R. - **Materiais de proteção térmica para sistemas construtivos de baixo custo estruturados em aço**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 236p, 2007.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 834 **Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements**.1999.

LAÍM, L. et. al.– **Análise numérica do comportamento estrutural de vigas de aço formado a frio. VIII Congresso de construção metálica e mista**. Guimarães, 2011

KANKANAMGE, N. D., MAHENDRAN, M. (2011). **“Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures”**. Thin-Walled Structures, Vol. 49, Issue 1, pp. 26–44, 2011.

MOTA, A. S. **Resistência ao fogo de colunas de aço enformado a frio com secção em sigma**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

PEREIRA, R. G. S. **Resistência mecânica residual de vigas em concreto armado após o incêndio – análise numérica**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

RANAWAKA, T., MAHENDRAN, M. **“Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures”**. Fire Safety Journal, Vol. 44, Issue 2, pp. 219–229, 2009.

ROCHA, W. C. **Estudo numérico de pilar em aço formado a frio com seção tubular quadrada em situação de incêndio**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

RODRIGUES, J. P. C., LAÍM, L., E CRAVEIRO, H. **“Experimental investigation on cold-formed steel beams with web stiffeners subjected to fire”**. 8th International Conference on Structures in fire, Shanghai, 2014.

SANTIAGO, H. A. **Estudo do comportamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, A. L. R. C. **Análise numérica não-linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à Compressão uniaxial**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SILVA, V.P. – **“Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation”** Engineering Structures, v.27, pp. 2036–2043, 2005.

SILVA, V.P. et. al. **A segurança contra incêndio no Brasil - Capítulo X – Segurança das estruturas em situação de incêndio**. Ed. 1. São Paulo: Projeto Editora, 2008. P. 135-167.