



CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE PILAR DE AÇO FORMADO A FRIO SEGUNDO PARÂMETROS DA NORMA BRASILEIRA

Marina Machado Leal dos Santos

Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

José Jéferson Rêgo Silva

mmls.marina@gmail.com

tacpires@yahoo.com.br

jjrs@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, 50670-901, Recife – PE, Brasil.

Resumo. *Este artigo apresenta a análise numérica de pilares de aço formados a frio em situação de incêndio. Utilizando-se o software Abaqus são feitas variações de parâmetros recomendados pela norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 e testes com elementos finitos do tipo casca e do tipo sólido além da variação do tamanho dos elementos utilizados. As temperaturas e os deslocamentos da estrutura são comparados com experimentos realizados por Costa (2013) a fim de validar qual modelo mais se aproxima dos resultados experimentais. Em seguida o modelo é utilizado para a simular o comportamento do mesmo pilar com revestimento de gesso em situação de incêndio, a fim de verificar o ganho de resistência quando comparado à situação inicial.*

Palavras-chaves: *Pilares de Aço formado a frio, Revestimento contra fogo, Situação de incêndio, Modelo numérico em Elementos Finitos.*

1 INTRODUÇÃO

Seções de aço formadas a frio são largamente utilizadas devido a elevada razão entre carga solicitante e resistência mecânica, além de possibilitarem a manutenção de um canteiro de obras limpo com grande redução das perdas de material. Uma das maiores desvantagens deste tipo de estrutura é a redução das propriedades mecânicas do aço quando submetido à elevadas temperaturas. Pilares requerem uma atenção ainda maior pois o colapso de um único elemento pode levar toda a estrutura à ruína. Para assegurar uma adequada resistência ao fogo de estruturas de aço, um método comumente empregado é o revestimento do perfil com matérias isolantes térmicos.

Ensaaios experimentais são essenciais para a compreensão do comportamento de estruturas de aço revestidas contra fogo, entretanto experimentos requerem muita mão de obra, gasto com materiais e um alto consumo de energia. Neste ponto é essencial o desenvolvimento de modelos numéricos confiáveis que possam prever como os pilares se comportam em situação de incêndio. Também é essencial assegurar que o modelo seja computacionalmente eficiente, ou seja que leve o menor tempo possível para ser processado com resultados coerentes, além de capaz de ser reproduzido.

Muitos estudos foram conduzidos no âmbito de prever numericamente o comportamento de pilares de aço formado a frio em situação de incêndio.

Feng, Wang e Davies (2002.a) propuseram um programa experimental com perfis de aço com seção U carregados axialmente. O principal objetivo do estudo foi compreender o comportamento da estrutura e o modo de falha destes perfis quando submetidos à altas temperaturas. O principal modo de flambagem observado nos testes foram as flambagem distorcional e dobramento por flexão. Feng, Wang e Davies (2002.b) reproduziram numericamente os ensaios utilizando o software Abaqus (Pawtucket, 2005). Concluiu-se que o software é eficiente para reproduzir o comportamento de estruturas de chapa fina desde que fornecidas as condições de contorno e as propriedades dos materiais adequadas.

Almeida (2012) conduziu 12 experimentos com pilares de aço usando seções U, I e 2R (chamadas duplamente reforçadas). O tempo de resistência ao fogo (TRRF) máximo foi de 13 min alcançado por um pilar tipo 2R. Reproduziu-se os resultados experimentais com o software de elementos finitos Ansys, com elementos tridimensionais. O modelo foi capaz de prever a resistência à compressão axial dos pilares em situação de incêndio comprovando a eficiência da utilização deste software para este tipo de análise.

Costa (2013) ensaiou 10 pilares de aço formadas a frio de seção fechada pela soldagem de dois perfis tipo U enrijecido. Metade dos exemplares tiveram a dilatação livre e a outra metade a dilatação restringida. As pilares foram carregadas axialmente com 40% (110 kN) e 80% (220 kN) da sua capacidade resistente ($N_{r,d}$) em situação ambiente. Aqueceu-se as amostras com um forno elétrico capaz de reproduzir a curva da ISO 834 (2014) para assim obter o TRRF segundo os critérios de falha da mesma. Conclui-se que a força de restrição à dilatação térmica e o aumento do nível de carregamento reduzem o tempo de falha dos pilares, cujo máximo foi de 09 min, alcançado por um exemplar não restringido e carregado com 110kN.

Quando se trata de proteger os elementos estruturais com material de revestimento contra fogo é notório o ganho no TRRF dos mesmos.

Feng, Wang e Davies (2003) continuaram seus estudos com proteção térmica de placas de gesso *gyproc* protegendo perfis tipo U. Eles observaram que de acordo com a espessura e com lã mineral preenchendo o vazio entre as placas tinha-se grande quedas de temperaturas. As amostras foram analisadas apenas no âmbito térmico mas verificou-se que a diminuição de temperatura é muito significativa quando o perfil é protegido. Um exemplo, pode ser observado na Fig.1, onde verifica-se que a temperatura na face não exposta ao incêndio (6) é 800 °C inferior à face exposta (1).

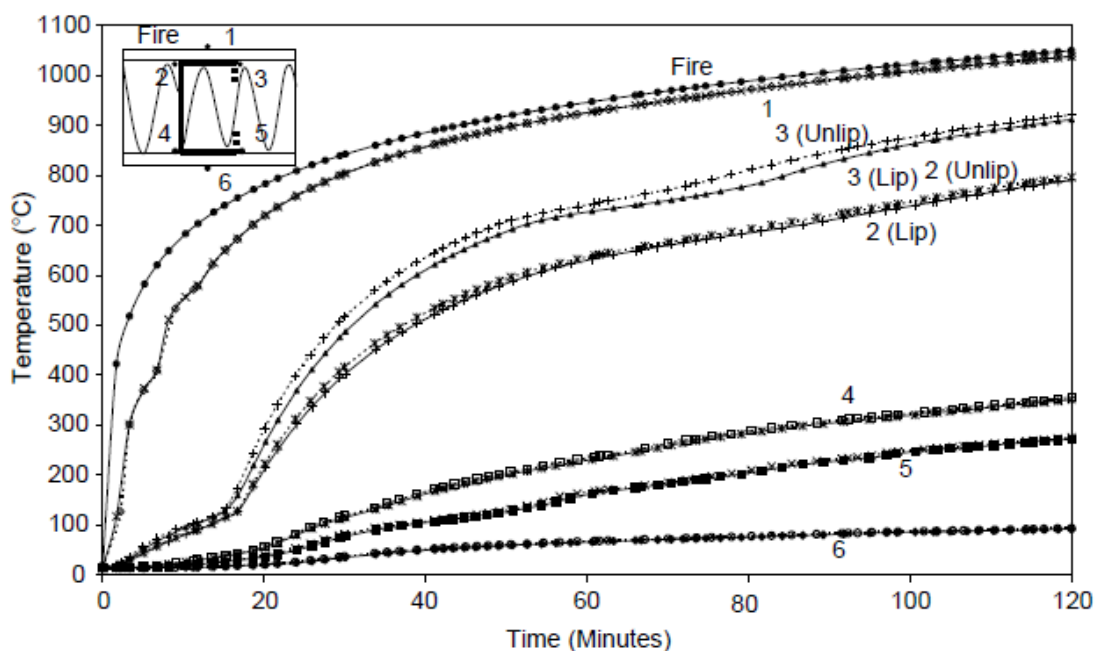


Figura 1: Temperaturas aferidas por Feng, Wang e Davies (2003) em um perfil protegido. Fonte: Feng Wang e Davies (2003).

Os autores simularam novamente o experimento no software ABAQUS e concluíram que o programa é eficiente para simular distribuições de temperatura detalhadas em perfis de aço formados a frio em situação de incêndio padrão. Para que a simulação seja efetiva considera-se que não há falha na integridade das placas de gesso e deve-se adotar condições de contorno adequadas.

Santos *et al* (2017) verificou que com uso de proteção passiva a resistência ao fogo dos pilares de aço formados a frio aumenta conforme o aumento da espessura do material de proteção, chegando a mais de 190% da resistência mecânica do perfil desprotegido com aplicação de placas de gesso de 40 mm de espessura. Foi observado também que o modelo numérico desenvolvido no software ABAQUS teve boa correlação com o simplificado apresentado na ABNT NBR 14323:2013.

Percebendo-se a necessidade de um modelo numérico eficiente para prever o comportamento de estruturas de aço com e sem revestimento contra fogo em situação de incêndio, o objetivo deste trabalho é:

- Desenvolver um modelo numérico não linear em elementos finitos bidimensionais e tridimensionais utilizando o software ABAQUS capaz de verificar a resistência ao fogo de pilares de aço com paredes finas;

- Comparar os resultados obtidos no modelo numérico com os resultados experimentais obtidos por Costa (2013) para avaliar qual modelo mais eficiente;
- Avaliar os parâmetros presentes na norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 para verificar qual coeficiente de redução de propriedades mecânicas melhor se adequa ao pilar analisado;
- Utilizar o modelo desenvolvido para a simulação do pilar revestido por placas de gesso.

2 MODELO NUMÉRICO

O software ABAQUS trabalha com elementos bidimensionais (tipo casca) e tridimensionais (tipo sólido), permitindo uma análise sequencial termomecânica não acoplada. Este tipo de análise é mais rápida e acarreta em menos problemas de convergência do que a análise acoplada. Oliveira (2012) realizou o mesmo tipo de análise, onde inicialmente é simulada a condição térmica para que os dados de saída desta primeira etapa sejam utilizados em uma segunda etapa de simulação mecânica como dados de entrada.

O modelo desenvolvido neste trabalho tem por objetivo reproduzir os pilares avaliados por Costa (2013) em seu programa experimental, para assim serem validados os resultados do modelo numérico. Todos os exemplares ensaiados tinham 2 m de comprimento. A seção transversal é composta por dois perfis do tipo U de espessura 3 mm (100x50x17x3 mm) enrijecido soldados formando uma seção fechada, conforme Fig.2.

Os pilares foram aquecidos segundo a curva de incêndio padronizada pela ISO 834 (2014) com incidência dos efeitos de radiação e convecção incidindo apenas em seu metro central. O carregamento aplicado foi de 110 kN correspondente a 40% da resistência característica do pilar à compressão em situação ambiente e sem dilatação restringida.

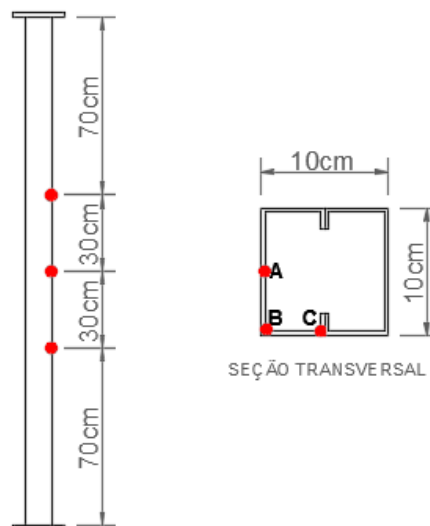


Figura 2: Exemplar analisado por Costa (2013) com localização dos termopares.

As propriedades térmicas do aço usadas na simulação foram coeficiente de dilatação térmica, condutividade e calor específico. As propriedades mecânicas introduzidas no software foram densidade, comportamento elástico e comportamento plástico. Essas propriedades variam conforme a temperatura e no modelo numérico seguiu-se as recomendações da ABNT NBR 14323:2013.

Para a redução das propriedades mecânicas a norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 traz dois coeficientes, um considerando que o perfil não é sujeito à flambagem local e outro para perfis sujeitos à flambagem local, nomeados respectivamente de $k_{y,\theta}$ e $k_{\sigma,\theta}$.

O método da resistência direta apresentado na norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço de chapa fina em situação ambiente ABNT NBR 14762:2010 sugere que o perfil de seção fechada está sujeito à flambagem local entretanto durante os ensaios conduzidos por Costa (2013) não foi possível distinguir qual modo de falha ocorreu primeiro. Por esse motivo, na modelagem numérica os dois coeficientes de redução das propriedades mecânicas foram analisados.

2.1 Análise da convergência de malha

Na análise térmica, tanto para os modelos do tipo casca quanto os do tipo sólido a pilar foi discretizada em elementos finitos com a maior dimensão medindo 10, 50 e 100 mm. Os elementos tipo casca utilizados foram paralelogramos com interpolação quadrática com 8 nós, (chamado de DS8 pelo programa). Os elementos sólidos utilizados foram prismáticos, também de ordem quadrática com 20 nós (chamado de DC3D20 pelo programa).

As temperaturas desenvolvidas no pilar mostraram resultados com diferenças de resultados inferiores a 10% para as diversas malhas analisadas, como pode ser visto na Fig.3.

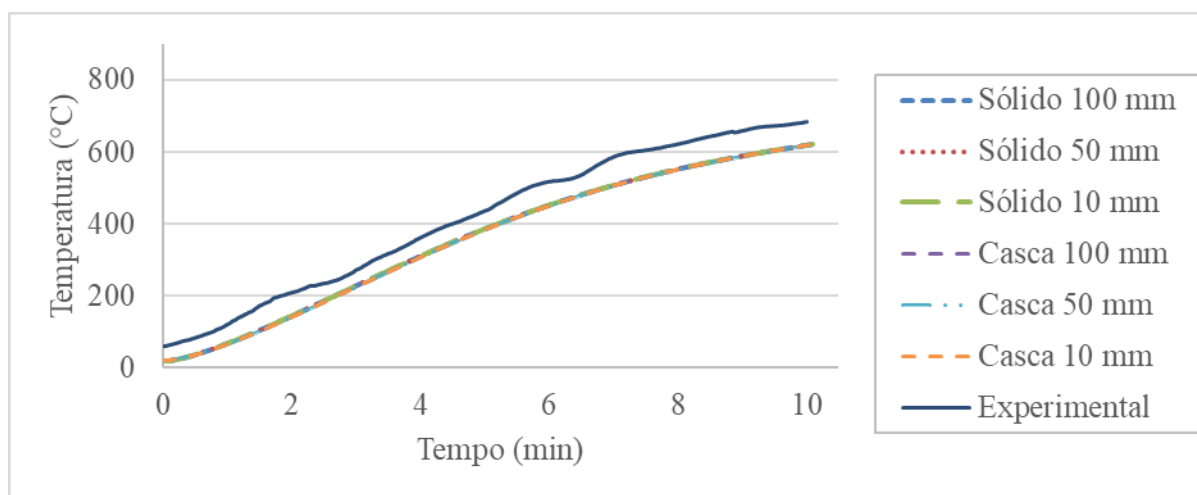


Figura 3: Análise da convergência de malha na simulação térmica.

As temperaturas desenvolvidas nos modelos numéricos e experimentais mostraram uma boa correlação, a diferença entre estes não excedeu 100°C. As temperaturas aferidas experimentalmente se mostraram maiores que as obtidas na simulação numérica, analogamente ao comportamento descrito por Oliveira (2012).

Da mesma forma que na análise térmica, na análise mecânica foram utilizados elementos com 10, 50 e 100 mm. Os elementos do tipo casca foram paralelogramos com interpolação de ordem quadrática de 8 nós (chamado de C3D20 pelo programa). Os elementos sólidos utilizados foram prismáticos também de ordem quadrática de 20 nós (chamado de C3D20 pelo programa). A convergência das malhas utilizadas pode ser vista nas Fig.4 e Fig.5, que mostra o deslocamento axial do pilar.

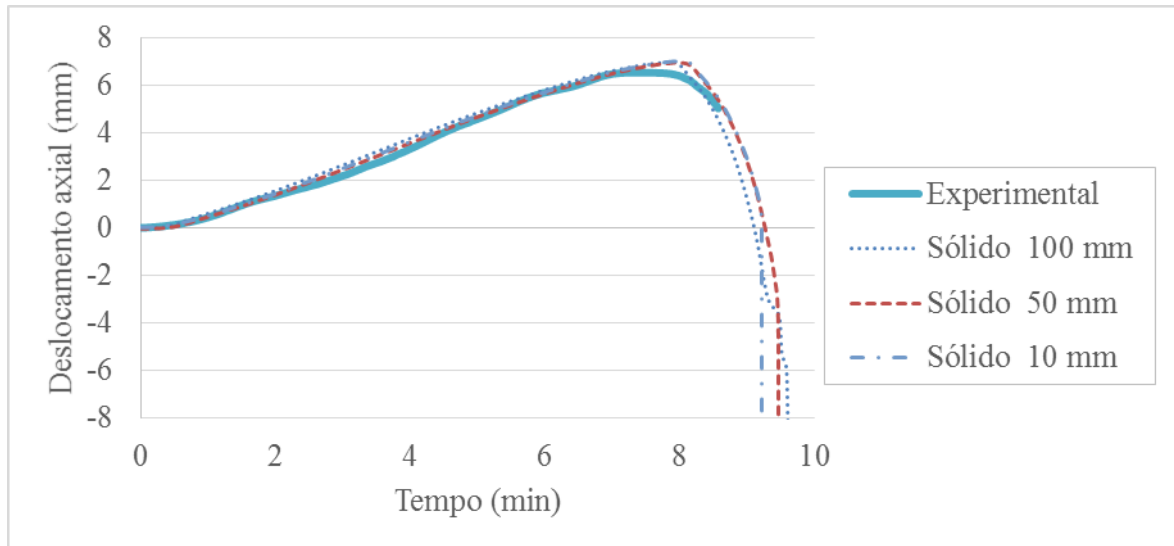


Figura 4: Análise da convergência mecânica de malha dos elementos tipo sólido.

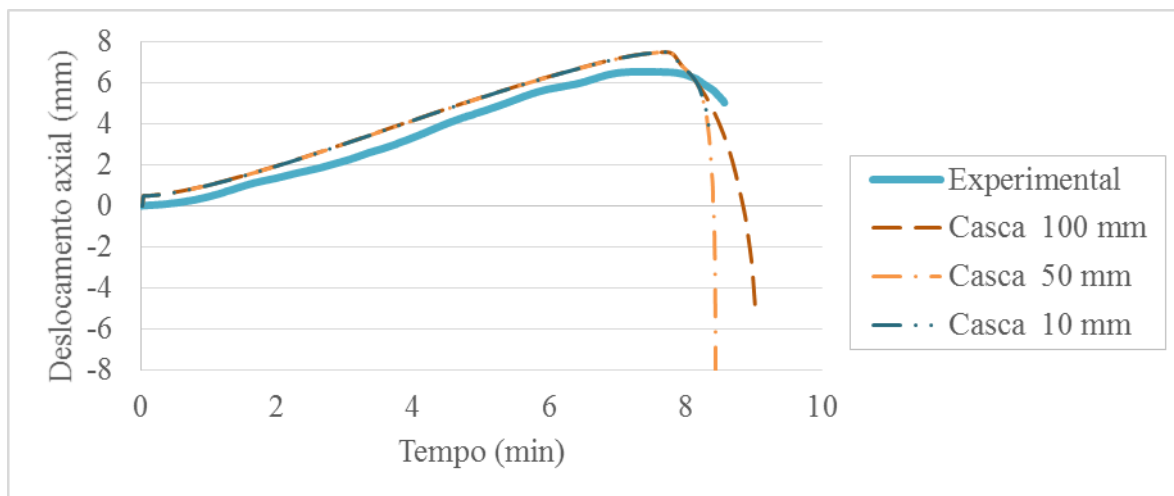


Figura 5: Análise da convergência mecânica de malha dos elementos tipo casca.

Para propósitos práticos, quando comparadas com o resultado experimental, mesmo a discretização com elementos de 100 mm mostrou um resultado acurado. Também se percebeu que tanto os elementos do tipo sólido quanto os elementos do tipo casca representaram bem o comportamento do pilar.

Como resultado desta convergência, a partir deste ponto, decidiu-se por utilizar a malha de 50 mm para os demais estudos deste trabalho, pois o tempo de processamento foi satisfatório e os resultados já convergiram quando comparados com a discretização em elementos de 10 mm. A quantidade de elementos, de nós e o tempo total de processamento de cada modelo pode ser visto na Tabela 01.

Tabela 1: Dados numéricos dos modelos testados

Análise		Malha					
		Casca			Sólido		
		10 mm	50 mm	100 mm	10 mm	50 mm	100 mm
Térmica	Número de elementos	10305	570	320	10630	720	400
	Número de nós	30917	1625	880	7899	4830	2710
	Tempo de processamento (s)	17759	2644	2829	2724	2271	2257
Mecânica	Número de elementos	10467	601	320	10630	720	400
	Número de nós	31307	1751	880	70899	4830	2710
	Tempo de processamento (s)	24578	1432	322	14461	791	355

2.2 Elemento casca vs Elemento sólido

A comparação entre os resultados obtidos com o elemento tipo casca e o elemento tipo sólido pode ser vista na Fig.6. A interpolação de ambos os elementos foi de ordem quadrática, o elemento casca foi um paralelogramo de 8 nós e o elemento sólido foi um prisma de 20 nós.

O elemento tipo casca pode ser utilizado nesta análise pois a espessura do perfil modelado é de 03 mm, fino o suficiente para se fazer a hipótese simplificadora de utilização de um elemento bidimensional. A diferença entre estes dois elementos é que como o elemento tipo casca é bidimensional, o usuário deve informar a espessura desejada para a análise, já o tipo sólido, por ser tridimensional tem a espessura de acordo com a discretização da malha. Como o elemento sólido é mais simples de ser modelado, gerando menos erros na geração de malha e se aproximou mais da curva de resultados experimentais, segue-se o estudo com a utilização de elementos do tipo sólido.

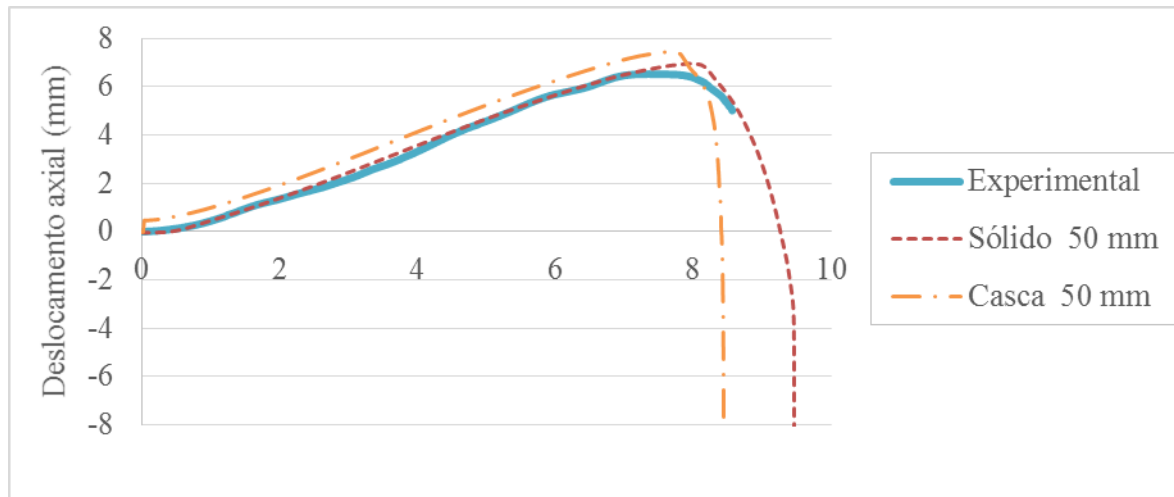


Figura 6: Comparação elemento casca vs elemento sólido.

2.3 Verificação dos coeficientes de redução propostos pela Norma brasileira

A norma brasileira de perfis de aço ABNT NBR 14762:2010 utilizada para verificar perfis de aço formados a frio recomenda o uso do método da resistência direta para a definição do modo de flambagem que pode ocorrer primeiro, se é o modo de flambagem local, global ou distorcional. Para as seções fechadas deste estudo, a carga para ocorrência da flambagem local e global foi a mesma, não ocorrendo flambagem distorcional.

Nos experimentos conduzidos por Costa (2013) não foi possível distinguir qual o primeiro modo de falha ocorrido. Por esse motivo verificou-se numericamente qual coeficiente de redução de propriedades mecânicas apresentado pela norma ANBT NBR 14323:2013 se aproximava mais dos resultados experimentais. $k_{y,\theta}$ ou $k_{\sigma,\theta}$.

Os dois coeficientes apresentados pela norma estão relacionados com o modo de falha do elemento estrutural, $k_{y,\theta}$ é recomendado para seções não sujeitas à flambagem local enquanto que $k_{\sigma,\theta}$ é recomendado para perfis sujeitos à flambagem local. Os resultados observados com a variação deste coeficiente podem ser vistos na Fig.7.

Na Fig.7 observa-se que o modelo com o coeficiente $k_{\sigma,\theta}$, para perfis sujeitos à flambagem local foi o que mais se aproximou do resultado experimental.

Ressalta-se que nas análises de convergência de malha e na comparação entre o elementos tipo casca com o elemento tipo sólido anteriormente apresentadas neste trabalho foi utilizado o coeficiente de redução $k_{\sigma,\theta}$, para perfis sujeitos à flambagem local.

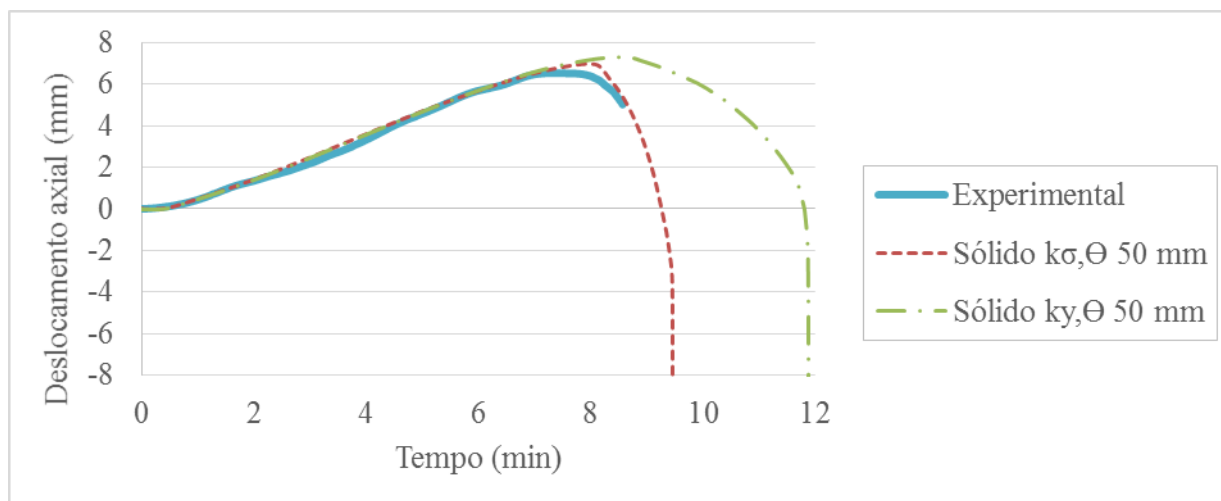


Figura 7: Resultados obtidos numericamente com os fatores de redução para flambagem local e global propostos pela ABNT NBR 14323:3013

3 PERFIL COM REVESTIMENTO CONTRA FOGO

Após a validação do modelo numérico empregou-se ao pilar uma proteção de gesso com espessuras de 10, 20, 30, 40 e 50 mm. As características aplicadas ao material de revestimento foram são densidade, emissividade, condutividade, calor específico, sendo seus valores de respectivamente: 800 kg/m³, 0,20 W/m°C, 1700 J/kg°C, (Gerkeen, 2007). Os dados para as propriedades dos materiais isolantes geralmente são encontrados na literatura por faixas de valores, entretanto graças a grande variação na produção do gesso o ideal é que se tenha a caracterização do mesmo antes da sua utilização como revestimento contra fogo.

Considerou-se que as propriedades térmicas do revestimento se mantiveram constantes ao longo do aquecimento e que entre a proteção e o perfil de aço não há perda de calor, mesma consideração feita por Gerkeen (2007).

No modelo numérico, o contato entre os elementos da proteção e o perfil foi considerado do tipo “TIE”, simulando o contato perfeito, para que não houvesse perda de calor e a radiação e convecção incidentes na proteção térmica fossem transferidas por condução para o aço.

As temperaturas e os deslocamentos obtidos no modelo numérico são apresentadas nas Fig.8 e Fig.9. Por questões de clareza das imagens estas são apresentadas apenas para as espessuras de 10, 30 e 50 mm.

Segundo Santos *et al* (2017) as temperaturas do pilar de aço obtidas na simulação numérica apresentam boa correlação com os resultados obtidos pelo método simplificado para estruturas de aço com revestimento contra fogo da ABNT NBR 14323:2013, quando ambos os métodos utilizam as mesmas propriedades para os materiais.

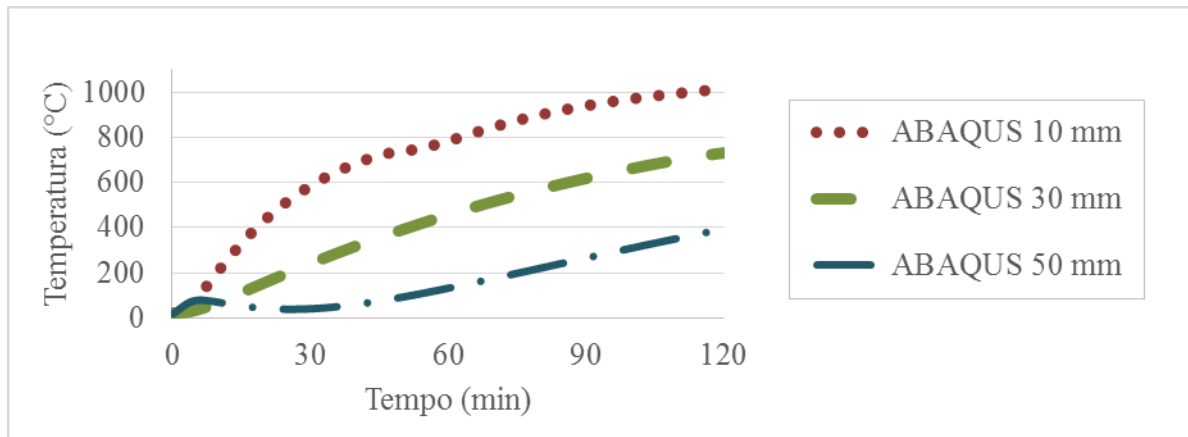


Figura 8: Temperaturas desenvolvidas no pilar com proteção de gesso

Observa-se que com o aumento da espessura da proteção passiva de revestimento as temperaturas têm um caimento significativo, o que faz com que o pilar resista ao incêndio por mais tempo. O decaimento das temperaturas foi similar ao observado em Feng, Wang e Davies (2003).

Ao se utilizar as temperaturas do modelo térmico no modelo mecânico, obtém-se a resistência ao fogo, seguindo-se o critério proposto pela ISO 834 (2014), onde o pilar falha quando a deformação axial atinge o valor de $L/100$ ou a taxa de deslocamento axial atinge o valor de $3L/1000$, onde L é o comprimento do pilar, em metros. Os deslocamentos obtidos no modelo numérico podem ser vistos na Fig.9.

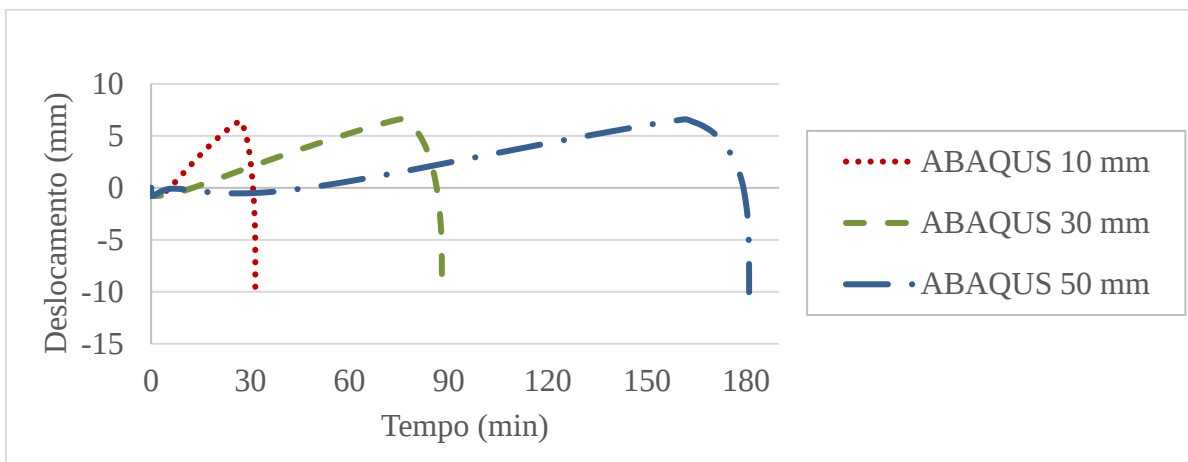


Figura 9: Deslocamento axial dos perfis

O modelo numérico não apresentou problemas de convergência para simular a parte mecânica. Observa-se que a resistência ao fogo tende a crescer consideravelmente com o aumento da espessura do revestimento contra fogo, a cada 10 mm acrescido na espessura de revestimento, tem-se ganhos superiores a 30% na resistência ao fogo.

Os valores de resistência ao fogo, assim como a razão deste aumento, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resistência ao fogo dos pilares de aço com proteção

Esp. da placa de gesso (mm)	TRRF ABAQUS (min)	$\frac{RF_{c/proteção}}{RF_{s/proteção}}$
0	9	1.0
10	32	3.6
20	58	6.4
30	88	9.8
40	135	15.0
50	181	20.1

Estes resultados preliminares indicam a possibilidade de utilização do modelo numérico desenvolvido neste estudo para pilares de aço com revestimento contra fogo. O modelo dos pilares revestido ainda está sendo aperfeiçoado e sua validação com resultados experimentais será apresentada em trabalhos futuros.

4 CONCLUSÃO

As análises feitas neste trabalho tiveram por objetivo a identificação dos melhores parâmetros a serem utilizados na simulação de perfis de aço formados a frio em situação de incêndio utilizando-se o software ABAQUS em elementos finitos. Com este estudo pode-se concluir que:

- A malha de 50 mm foi a mais adequada para a simulação numérica pois apresenta convergência quando comparada com a malha mais refinada de 10 mm;
- O elemento sólido conseguiu representar melhor o comportamento experimental observado por Costa (2013) para o pilar em situação de incêndio quando comparado com o elemento tipo casca;
- O coeficiente de redução proposto pela ABNT NBR 14323:2013 mais adequado para a pilar em estudo foi o $k_{\sigma,e}$, proposto para perfis sujeitos à flambagem local;
- O modelo desenvolvido pode ser aplicado para a simulação de pilares com revestimento contra fogo de placas de gesso;
- O aumento da espessura de proteção apresentou ganhos significativos na resistência ao fogo dos pilares. Por exemplo, a placa de 10 mm mais do que triplica a resistência ao fogo do pilar sem proteção.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a FACEPE e a CAPES pelo auxílio financeiro prestado para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERENCIAS

- ABNT NBR 14323:2013. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT NBR 14762:2010 - **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010.
- Costa, L.M – **Análise experimental de pilares em aço formado a frio submetidos a altas temperaturas com restrição à dilatação axial livre e restringida**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – PE, 2013.
- Feng, M.; Wang, Y. C.; Davies, J. M. - **Structural Behaviour of Cold-Formed Thin-Walled Steel Channel Columns at Elevated Temperatures. Part 1: Experiments**. Thin-Walled Structures, v. 41, 543-570, 2003.
- Feng, M.; Wang, Y. C.; Davies, J. M. - **Structural Behaviour of Cold-Formed Thin-Walled Steel Channel Columns at Elevated Temperatures. Part 2: Design Calculation and Numerical Analysis**. Thin-Walled Structures. v. 41, 571-594, 2003.
- Feng, M.; Wang, Y. C.; Davies, J. M. - **Thermal performance of cold-formed thinwalled steel panel system in fire**. Fire Safety Journal, v.38, 365-394, 2003.
- Gerkeen, A.L.R. - **Materiais De Proteção Térmica Para Sistemas Construtivos De Baixo Custo Estruturados Em Aço**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte – MG, 2007.
- INTERNATIONAL STANDARD. ISO 834:2014 - **Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements**. International Organization of Standardization, Genève, 2014.
- Pires, T.A.C.; Rodrigues, J.P.C.; Rêgo Silva, J.J.; - **Fire resistance of concrete filled circular hollow columns with restrained thermal elongation**. Journal of Constructional Steel Research, v. 77, pp. 82-94. 2012.
- Pawtucket, Rhode Island: Hibbit, Carlsson and Sorensson Inc. – **ABAQUS/standard 6.11 user's manual. volumes I-III**. v. 6.11. USA. 2011.
- Santos. M.M.L; Pires. T.A.C; Silva. J.J.R.; - **Pilares de aço formados a frio com revestimento contra fogo**. 4º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio - CILASCI. Recife-PE. 2017
- Silva, V.P. – **Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process - a simple derivation**. Engineering Structures. V. 27. p. 2036–2043. 2005.