

ANÁLISE NUMÉRICA DE PILARES DE AÇO FORMADO A FRIO COM RESTRIÇÃO AXIAL EM TEMPERATURAS ELEVADAS.

NUMERICAL ANALYSIS OF AXIALLY RESTRAINED COLD FORMED STEEL COLUMNS AT HIGH TEMPERATURES.

Miguel E. Tacha Torres (1); Saulo José de Castro Almeida (2); Jorge Munaiar Neto (3); João Paulo Correia Rodrigues (4)

(1) Engenheiro Civil, Universidad de Los Andes, Bogotá - DC, Colômbia.

(2) Prof. Dr., Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Brasil.

(3) Prof. Associado, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos-SP, Brasil

(4) Prof. Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal

E-mail para Correspondência: miguelacha753@hotmail.com; (P) Apresentador

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma investigação numérica sobre o comportamento estrutural de pilares de aço formado a frio submetidos a temperaturas elevadas considerando a influência da restrição à dilatação térmica. Os modelos numéricos foram construídos no software ABAQUS e calibrados por meio de resultados experimentais. Na sequência foram realizadas análises paramétricas com objetivo de investigar numericamente os efeitos de alguns parâmetros, a saber, geometria e dimensões da seção transversal, esbeltezas local e global, condições de vinculação nas extremidades, nível de força inicialmente aplicada e influência da restrição axial na temperatura crítica dos pilares. Com os resultados obtidos foi possível identificar tendências nas variações das temperaturas críticas dos pilares analisados e a influência que os parâmetros objeto do estudo tem sobre o comportamento em temperatura elevada de pilares de aço formados a frio. De acordo com os resultados, o nível de restrição axial, altura da seção e nível de carregamento apresentaram uma tendência no comportamento do pilar quando submetido a temperaturas elevadas. Contrariamente, evidenciou-se que parâmetros como espessura da chapa e altura do pilar quando analisados isoladamente apresentam comportamentos divergentes que dificultam a simplificação do comportamento dos pilares estudados.

Palavras chaves: aço formado a frio; pilares; restrição axial; incêndio; análise numérica.

Abstract: This work aims to present a numerical research on the structural behavior of cold-formed steel columns subjected to high temperatures considering the influence of the restraint to the thermal elongation. The numerical models were developed in the software ABAQUS and calibrated based on the experimental. Parametric analyzes will be carried out with the objective of numerically investigates the effects of some parameters such as geometry and cross-section dimensions, local and global slenderness, end support conditions, initially applied force and the influence of the axial restraint on the critical temperature of the columns. With the results obtained, it was possible to identify trends in the critical temperature variations of the analyzed columns and the influence that the parameters of the study have on the high temperature behavior of cold formed steel columns. According to the results, the axial restraint level, cross-section geometry and loading level showed a tendency in the behavior of the column when subjected to elevated temperatures. In contrast, it was evidenced that parameters such as plate thickness and column length when analyzed separately present divergent behaviors that make it difficult to simplify the behavior of the columns studied.

Keywords: cold-formed steel; columns; axial restraint; fire; numerical analysis.



1.1 INTRODUÇÃO

O uso de elementos de aço formados frios cresceu amplamente na indústria da construção civil desde o início dos anos de 1950, graças às diferentes vantagens quando comparados aos elementos laminados a quente. As principais vantagens dos elementos formados a frio são a alta relação resistência-peso e rigidez das peças, facilidade no manuseio, estocagem, instalação e fabricação de novas geometrias (Lawson, 1992).

Como consequência dessas vantagens, diferentes normas e códigos foram desenvolvidos para promover a implementação desse tipo de elemento na construção civil. Nos Estados Unidos, por exemplo, o AISI publicou a versão mais recente da especificação técnica “AISI S100-16 *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*”, incluindo o método da resistência direta para o dimensionamento dos elementos de aço formados a frio. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT publicou no ano 2010 a NBR 14762:2010 - *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*, na qual, estabeleceram-se os requisitos básicos para o dimensionamento (à temperatura ambiente) de perfis estruturais de aços formados a frio baseados no método dos estados limites. Por outro lado, até o presente momento não se tem um documento normativo com métodos de dimensionamentos construídos exclusivamente com base em estudos realizados sobre elementos de aço formados a frio em temperaturas elevadas. Atualmente, os métodos de cálculo do EN 1993-1.2:2005 para elementos de aço laminados a quente e soldados têm sido aplicados para elementos de aço formados a frio com seção classe 4. Entretanto, estudos mostram que essa consideração nem sempre é adequada.

Recentemente, estudos do comportamento de elementos formados a frio em temperaturas elevadas foram realizados com o objetivo de desenvolver métodos de dimensionamento baseados no desempenho em altas temperaturas. Porém, muitos desses estudos foram realizados em elementos isolados e não em estruturas completas ou em elementos que considerassem a interação com outros elementos (Ala-Outinen & Myllymäk, 1995) (Heva, 2009) (Ranawaka & Mahendran, 2009).

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma investigação numérica sobre o comportamento estrutural de pilares de aço formado a frio de seção 2C submetidos a temperaturas elevadas considerando a influência da restrição à dilatação térmica, permitindo investigar os efeitos de alguns parâmetros, a saber, dimensões da seção transversal, esbeltezas local e global, condições de vinculação nas extremidades, nível de força inicialmente aplicada e influência da restrição axial na temperatura crítica dos pilares. Para tal, foram desenvolvidos modelos numéricos utilizando o software de elementos finitos ABAQUS e devidamente calibrados com trabalhos realizados anteriormente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (Craveiro, 2015).

2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os modelos numéricos construídos neste trabalho tiveram como base os ensaios experimentais desenvolvidos anteriormente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra no âmbito do projeto de investigação FireColdSteel – *Análise experimental e numérica de elementos estruturais de aço enformado a frio sujeito a incêndio* (Craveiro, 2015), onde estudou-se o comportamento em temperaturas elevadas de pilares em aço formado a frio axialmente restringidos.

Nos ensaios experimentais apresentados em Craveiro (2015), foram analisados pilares com comprimentos de 2950 mm, seção 2C, conforme Figura 1, constituídos por aço S280GD+Z de dupla fase galvanizada com Zinco. Os testes foram realizados em temperatura ambiente e em temperaturas elevadas incluindo a restrição axial.

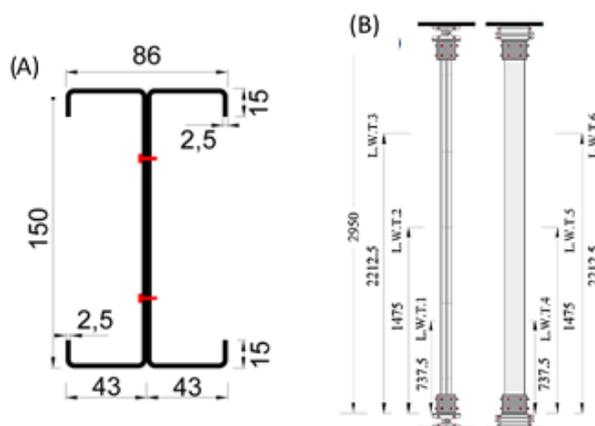


Figura 1. Perfis usados no estudo experimental; (A) Dimensões da seção 2C; (B) Esquema e comprimentos dos pilares ensaiados. Adaptado (Craveiro, 2015).

A calibração dos modelos numéricos em temperatura ambiente foi realizada com base nos resultados experimentais de 6 pilares apresentados em Craveiro (2015), 3 biapoiados e 3 com apoios semirrígidos. Por meio do teste de compressão obteve-se a carga última (P_{max}) e o deslocamento vertical, para diferentes condições de contorno nas extremidades dos pilares.

Por sua vez, a calibração dos modelos numéricos em temperaturas elevadas foi realizada tomando como referência os resultados experimentais de 24 pilares axialmente restringidos com valores de restrição axial ($K_{a,c}$), carga inicial ou de serviço (P_o) apresentados na Tabela 1. A nomenclatura adotada em Craveiro (2015), ressalta o tipo de seção seguido pela condição de contorno, carga de serviço e restrição axial respectivamente. Por exemplo, o elemento “2C_PP_30_LL_K1” é um pilar com seção 2C, biapoiado, com carga de serviço igual a 30% da força de compressão resistente de projeto $N_{b,Rd}$ (corrigido pela interação do esforço normal com flexão) e valor de restrição axial K1.

Tabela 1. Valores de carga de serviço P_0 e restrição axial $K_{a,c}$ usados nos ensaios experimentais.
Fonte: Adaptado (Craveiro, 2015)

TEST REFERENCE*	N_{cr}^{**} [KN]	$N_{b,Rd}$ [KN]	P_0 [KN]	$K_{a,c}$ [KN/mm]	TEST REFERENCE*	N_{cr}^{**} [KN]	$N_{b,Rd}$ [KN]	P_0 [KN]	$K_{a,c}$ [KN/mm]
2C_PP_30_LL_K1	98	85,5	25,70	3	2C_SR_30_LL_K3	452	187	56,3	3
2C_PP_30_LL_K2				13	2C_SR_30_LL_K4				13
2C_PP_50_LL_K1			42,80	3	2C_SR_50_LL_K3			93,8	3
2C_PP_50_LL_K2				13	2C_SR_50_LL_K4				13

* PP= Pinned ended – Extremidades rotuladas; SR: Semi-Rigid – Extremidades com apoios semirrígidos

** N_{cr} = Carga crítica de flambagem elástica, $\frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}$

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 Aspectos gerais

Os modelos numéricos foram desenvolvidos no software ABAQUS e conforme mencionado anteriormente, foram calibrados tanto em temperatura ambiente como em temperaturas elevadas com base nos resultados experimentais apresentados em Craveiro (2015).

As análises numéricas foram realizadas de forma sequencial em duas etapas, análise de autovalor e análise estrutural não linear. A análise de autovalor foi realizada para obter a geometria das imperfeições geométricas local e global. Na sequência as imperfeições geométricas iniciais foram inseridas no modelo numérico tanto em temperatura ambiente como em temperaturas elevadas, usando os modos obtidos na análise do autovalor. No presente trabalho foram adotados os valores de $L/1000$ e $L/500$ para a imperfeição global e $H/200$ e $H/100$ para a imperfeição local.

As dimensões usadas no modelo numérico correspondem àquelas apresentadas na Figura 1. Foram analisadas duas condições de apoio nas extremidades, a saber, pilares com extremidades simplesmente apoiadas e pilares com apoios semirrígidos nas extremidades.

3.2 Caracterização do material

As propriedades mecânicas do material utilizado na construção do modelo são aquelas apresentadas em Craveiro (2015) para o aço S280 GD + Z, como resultado de ensaios realizados pelo autor, nos quais foram obtidas tensões e deformações nominais do material. Adicionalmente, o autor da caracterização do material realizou um ajuste dos resultados obtidos baseado no modelo de tensão e deformação proposto por Ramberg e Osgood (Craveiro, 2015). Na sequência foram calculadas as tensões e deformações verdadeiras que foram usadas no ABAQUS para definição do material. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresentam-se as tensões e deformações para diferentes temperaturas.

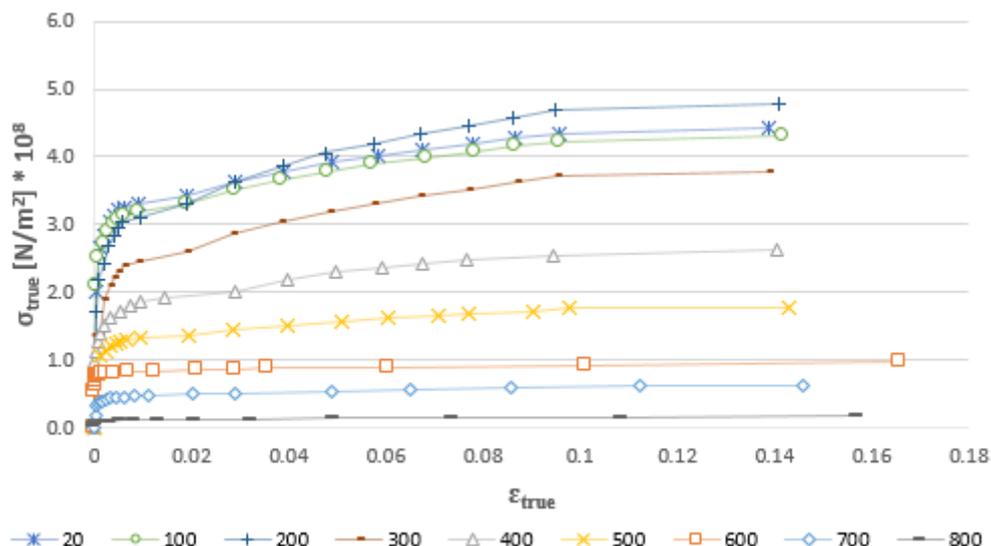


Figura 2. Tensões e deformações verdadeiras em função da temperatura.
Adaptado (Craveiro, 2015).

Com relação ao coeficiente de expansão térmica, conforme exposto em Craveiro (2015), os valores para o coeficiente de expansão térmica sugerido pelas normas europeias (EN-1993-1-2,2005) podem ser considerados conservadores quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente. Nesse sentido, devido à importância desse parâmetro, no presente estudo foram usados os valores propostos pelo autor dos ensaios experimentais, conforme apresentado em Craveiro (2015).

Finalmente, o módulo de elasticidade (E) e a resistência ao escoamento (f_y) utilizados nos modelos numéricos foram calculados com base nos fatores de redução propostos em Craveiro (2015) para diferentes temperaturas.

3.3 Malha de elementos finitos

Os modelos numéricos foram construídos usando o elemento tipo casca (*shell*). O elemento finito escolhido foi o tipo S4R: casca de uso geral de 4 nós com integração reduzida (Abaqus Analysis User's Guide, 2014).

Adicionalmente, foi realizado um estudo com diferentes dimensões da malha de elementos finitos com o objetivo de avaliar o comportamento do modelo. Os resultados obtidos desse estudo permitiram escolher o tamanho da malha igual a 10 mm, já que não apresenta grandes variações nos resultados quando comparado com tamanhos menores e reduz consideravelmente o tempo de processamento dos modelos, conforme Figura 3.

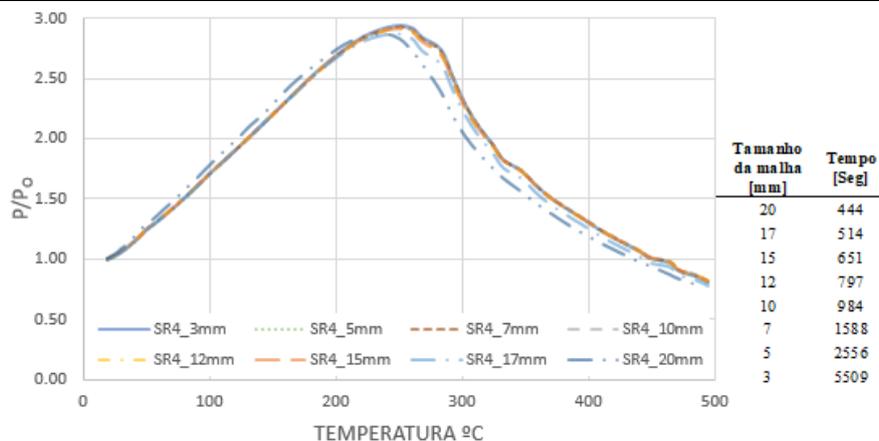


Figura 3. Estudo para determinação do tamanho de malha no modelo numérico.

3.4 Validação do Modelo Numérico

3.4.1 Modelo Numérico – Temperatura Ambiente

A validação do modelo em temperatura ambiente foi realizada com base nos resultados obtidos nas análises de autovalores e nas análises estruturais não lineares. Para as análises de autovalores compararam-se as forças críticas dos pilares para cada as duas condições de vinculação nas extremidades (apoio simples ou semirrígido). Conforme apresentado na Tabela 2, os modelos numéricos apresentaram resultados próximos aos teóricos. Embora a análise de autovalor seja uma etapa para a qual não se espera grandes diferenças entre resultados numéricos e teóricos, se faz importante, em especial, porque modelos de seção 2C envolvem a junção de dois perfis por meio de parafusos e a consideração de elementos de contato entre os mesmos.

Tabela 2. Fatores de redução e módulos de elasticidade usados no modelo numérico.

	N_{cr}^* [KN]	N_{cr} FEA[KN]	N_{cr} FEA/ N_{cr}^*
2C_PP	98	100,2	1,02
2C_SR	452	447,32	0,99

* N_{cr} = Carga crítica de flambagem elástica, $\frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}$

No que se refere à calibração dos modelos para as análises estruturais não lineares em temperatura ambiente, a Figura 4 evidencia que os mesmos apresentam concordância com os resultados experimentais apresentados em Craveiro (2015). Com o objetivo de melhor representar a comparação entre resultados numéricos experimentais, em alguns casos foi necessário realizar o offset dos resultados numéricos para representar a acomodação dos elementos durante a aplicação de carga nos ensaios experimentais, como por exemplo no caso da Figura 4 (B), onde adicionou-se um deslocamento inicial de 1,5 mm.

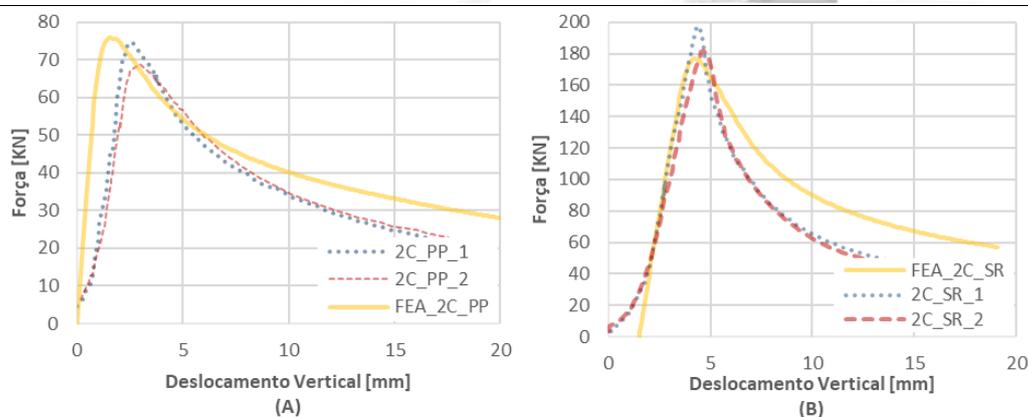


Figura 4. Comparativo do modelo numérico e ensaios experimentais – Temperatura ambiente;
(A) Pilar com seção 2C biapoiado; (B) Pilar com seção 2Ce apoios semirrígidos.

3.4.2 Modelo Numérico – Temperaturas Elevadas

A validação do modelo numérico em temperaturas elevadas foi realizada para diferentes níveis de carregamento e restrição axial à expansão térmica conforme Tabela 1. Essa restrição foi simulada através de uma mola localizada no centroide dos pilares conforme apresentado na Figura 5.

Para realizar a validação do modelo foi comparada a relação entre a força de restrição no pilar gerado pelo aquecimento da peça e força inicial de carregamento (P/P_0) em função da temperatura. Na Figura 6 se apresentam os resultados do modelo numérico em temperaturas elevadas para os pilares com seção 2C e os resultados experimentais apresentados em Craveiro (2015).

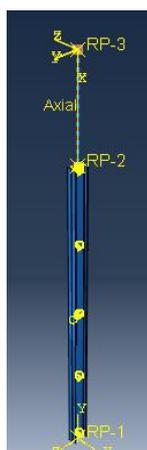


Figura 5. Modelo numérico submetido a temperaturas elevadas e com restrição axial

De acordo com os resultados apresentados na Figura 6, de modo geral os modelos numéricos são capazes de representar de forma satisfatória o comportamento de pilares com seção 2C em temperaturas elevadas considerando a restrição axial ao alongamento térmico.

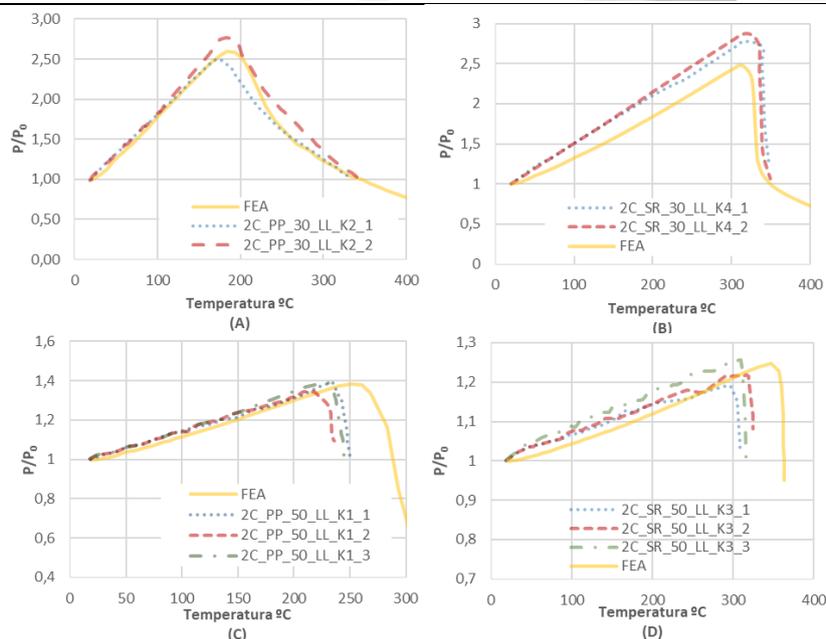


Figura 6. Comparativo do modelo numérico e ensaios experimentais – Temperatura Elevada;
(A) Pilar com seção 2C_PP_30_K2; (B) Pilar com seção 2C_SR_30_K4;
(C) Pilar com seção 2C_PP_50_K1; (D) Pilar com seção 2C_SR_30_K3.

3.5 Análise paramétrica

A análise paramétrica foi realizada para avaliar influência da altura da seção, espessura da chapa, altura da coluna, nível de carregamento, condições de contorno nas extremidades do pilar e nível de restrição axial na determinação da temperatura crítica de pilares com seção 2C. Os valores para cada um desses parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros avaliados na análise numérica

Parâmetro	Valores avaliados		
Altura da alma [mm]	150	250	
Espessura da Chapa [mm]	1,5	3,0	
Altura do pilar [mm]	1000	2000	3000
Nível de Carregamento*	30% Nc,Rd		50% Nc,Rd
Condições de contorno	Biapoiado		Semirrígido
Nível de restrição axial**	0%	5%	10%
	20%	50%	100%

* Nc,Rd - Calculada usando o método da seção efetiva conforme a norma ABNT NBR 14762:2010

** Porcentagem da rigidez axial da coluna $K_{a,c} = EA/L_c$

As dimensões da mesa e dos enrijecedores das seções foram mantidas constantes 43 e 15 mm respectivamente. Do mesmo modo, as imperfeições geométricas das peças foram mantidas iguais a L/1000 (Global) e H/200 (Local).



Para o processamento dos 288 modelos foi adotada uma convenção para a identificação de cada um dos pilares que descreve o tipo de seção, condição de apoio nas extremidades, comprimento do pilar, altura da alma, espessura da peça e nível de carregamento respectivamente. Por exemplo, o pilar identificado como “2C_PP_1000_250_1_5_30%” refere-se ao pilar 2C, biapoiado (PP para biapoiado ou SR para Semirrígido), com comprimento de 1000 mm, altura da alma com dimensão igual a 250 mm, com espessura de chapa igual a 1,5 mm e 30% $N_{c,Rd}$ como nível de carregamento.

3.6 Análise e discussão dos resultados

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada um dos parâmetros objetos da análise paramétrica desenvolvida. Neles apresentam-se os comparativos entre as temperaturas críticas (θ_{cr}) obtidas para cada um dos pilares analisados. No presente trabalho adotou-se como temperatura crítica aquela correspondente ao instante em que os pilares são incapazes de resistir o carregamento de serviço para qual foram dimensionados, ou seja, quando a força axial solicitante retorna ao seu valor inicial P_0 e a relação P/P_0 torna-se igual a 1 novamente.

3.6.1 Altura da seção

Para a avaliação da influência da mudança de altura da alma na determinação da temperatura crítica foram construídas tabelas iguais a Tabela 4. De acordo com os resultados, para a maioria dos casos a variação da temperatura crítica em relação a mudança de altura da alma não é superior a 5%. As maiores diferenças foram identificadas para os casos particulares dos pilares com comprimentos de 2000 e 3000m com espessura da chapa igual a 1.5 mm, os quais apresentaram variações máximas entre as temperaturas críticas de 11% para pilares em condição semirrígida e de 17% para pilares biapoiados, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Diferenças entre valores de temperaturas críticas para pilares de seção 2C_PP e 2C_SR– Parâmetro base: Altura da alma da seção.

Nível de restrição axial	2C_PP_2000_150_1_5_50%	2C_PP_3000_150_1_5_30%	2C_SR_3000_150_1_5_50%
	2C_PP_2000_250_1_5_50%	2C_PP_3000_250_1_5_30%	2C_SR_3000_250_1_5_50%
5	-5%	5%	-2%
10	-5%	14%	-2%
20	11%	16%	6%
50	16%	16%	6%
100	17%	16%	11%

% = $\theta_{cr,h=250} - \theta_{cr,h=150}$, onde h é altura da alma da seção

3.6.2 Espessura dos perfis

De modo geral, o aumento de espessura das chapas tem como consequência aumentos nas temperaturas críticas dos pilares, porém, esse comportamento precisa da análise em conjunto de outros parâmetros como alturas da seção da alma, comprimento e condição de apoio do pilar. Por exemplo, os pilares biapoiados com comprimentos de 3000 mm apresentaram aumentos nas temperaturas críticas com aumento da espessura, sendo que a magnitude desse aumento parece depender da altura da alma já que se evidenciaram incrementos médios de 15% para perfis com altura da alma de 150 mm e de 4% para alturas de 250mm. Para a condição de apoio semirrígida, a altura da alma também apresentou influência em conjunto com a mudança de espessura das chapas. Pilares com altura da alma igual a 250 apresentaram aumento das temperaturas críticas, em média, de 4% em pilares de 1000 mm com o aumento da espessura. Por outro lado, para pilares com comprimentos de 2000 e 3000 apresentaram-se diminuições médias de 6% nas temperaturas críticas dos pilares com o aumento da espessura.

3.6.3 Nível de restrição axial

De modo geral, em todos os pilares, para o nível de restrição igual a 5% já é perceptível uma diminuição significativa na temperatura crítica quando comparado com os pilares sem restrição, conforme se verifica nas Figuras 7 e 8. Todavia, destaca-se que para condição de apoio semirrígidas nas extremidades os pilares de comprimento de 1000 mm praticamente não apresentaram variações nas temperaturas críticas, enquanto nos comprimentos de 2000 e 3000 as diminuições medias foram de 11 e 15%, conforme observa-se na Figura 7. Por outro lado, conforme figura 8, para a condição de apoio rotulada, há redução da temperatura crítica com o aumento da restrição axial para todos os comprimentos investigados. Por fim, destaca-se que para níveis de restrição axial maiores que 20% não se evidenciaram grandes diferenças nas temperaturas críticas obtidas, conforme os resultados apresentados nas figuras 7 e 8.

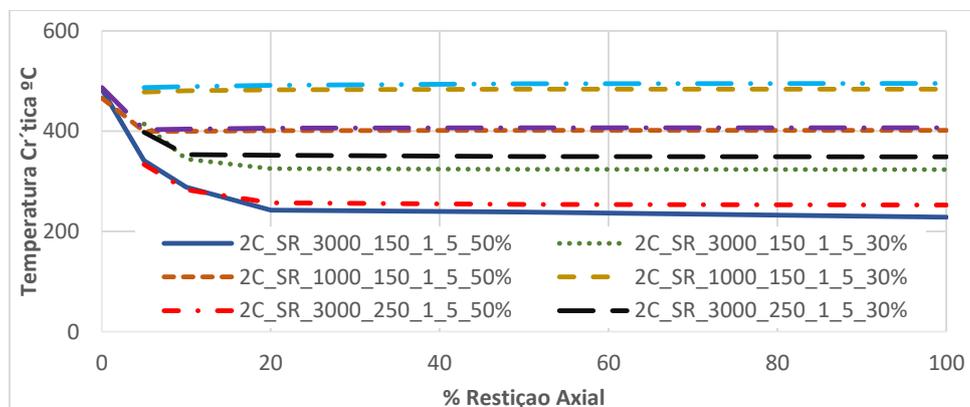


Figura 7. Temperaturas críticas seções 2C em condição semirrígida com alturas de pilar de 1000 e 3000 mm, altura da alma 150 e 250 mm, espessura da chapa 1.5 mm e dois níveis de carregamento para diferentes porcentagens de restrição axial.

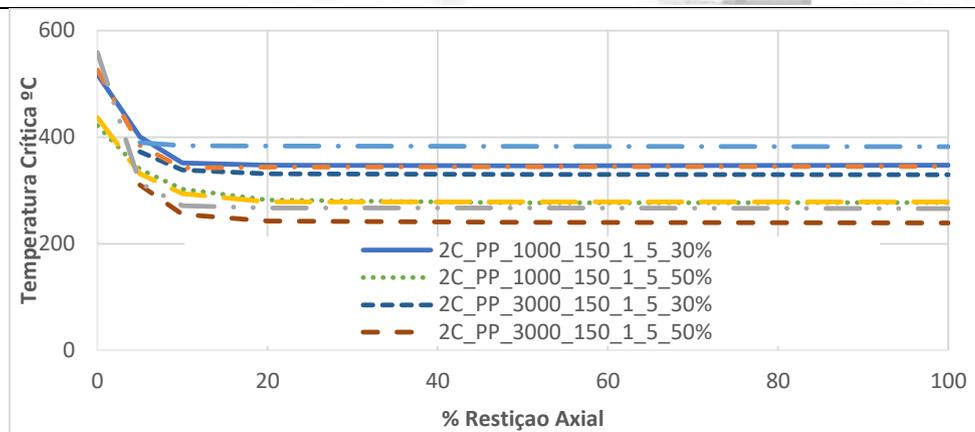


Figura 8. Temperaturas críticas seções biapoiados 2C com alturas de pilar de 1000 e 3000 mm, altura da alma 150 e 250 mm, espessura da chapa 1.5 mm e dois níveis de carregamento para diferentes porcentagens de restrição axial.

De modo geral, a relação P/P_0 apresenta diminuições no valor máximo quando são comparados os pilares biapoiados e em condição semirrígida conforme exemplificado na Figura 9.

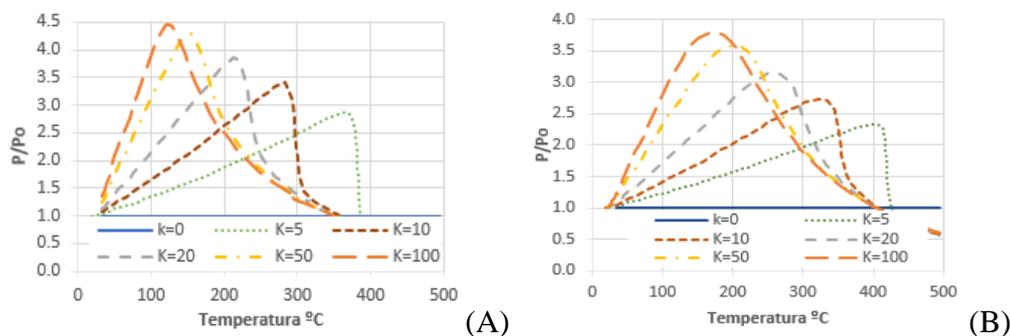


Figura 9. Relação P/P_0 em função de temperatura para pilares de 2000mm. (A) 2C_PP_250_1.5_30%; (B) 2C_SR_250_1.5_30%.

3.6.4 Nível de carregamento

Referente aos diferentes níveis de carregamentos aplicados nos pilares, como era de se esperar, obtiveram-se diminuições nas temperaturas críticas quando foram aumentados os níveis de carregamento de 30 para 50 %. Todavia, de modo geral, essas diminuições são similares quando analisados todos os parâmetros objeto do presente estudo. A diminuição para comprimentos de 1000, 2000 e 3000 mm foi de 19, 26 e 27% para pilares biapoiados, e de 20, 21 e 24% para a condição de apoio semirrígida.

3.6.5 Altura do pilar

A análise da relação P/P_0 dos pilares tendo como referência a variação da altura do pilar, apresentou uma diminuição no valor máximo de P/P_0 com a diminuição do comprimento,

como esperado. Como evidenciado na Figura 10 a diminuição dessa variação pode ser maior ou menor dependendo da condição de apoio do pilar.

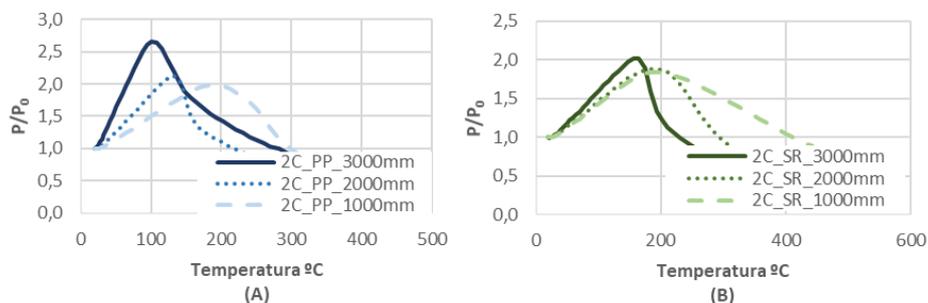


Figura 10. Variação da relação P/P_0 do pilar com altura da seção de 250, espessura da chapa de 3.0 mm, nível de carregamento e restrição axial de 50%; (A) pilar biapoado; (B) pilar em condição semirrígida.

Por outro lado, realizando a análise da variação da temperatura crítica em função da altura dos pilares não apresentou uma tendência para todos os casos objeto do presente estudo. Nesse sentido, realizaram-se análises para casos particulares, a saber, foram comparadas as temperaturas críticas de pilares de comprimentos de 1000 e 2000 mm, 2000 e 3000 mm, e 1000 e 3000 mm para as duas condições de apoio dos pilares, conforme se segue.

3.6.5.1 Pilares biapoados

Quando foram comparadas as temperaturas de pilares com comprimentos de 2000 mm em relação a pilares de 1000 mm, obtiveram-se de modo geral diminuições nas temperaturas críticas dos mesmos, sendo que essa diminuição podia ser maior ou menor dependendo da espessura da chapa e o nível de carregamento do pilar. Tendo como exemplo os valores apresentados na Tabela 5, evidenciou-se que para pilares com espessura de 3 mm foram obtidas reduções médias de 14% e 23% para níveis de carregamento iguais a 30 e 50 % respectivamente, enquanto, para os mesmos níveis de carga mas para espessuras da chapa igual a 1,5 mm as diminuições médias foram de 8 e 11%;

Tabela 5 Diferenças entre valores de temperaturas críticas para pilares biapoados de seção 2C. Parâmetro base: Altura do pilar.

Nível de restrição axial	2C_PP_1000_150_3_0_30%	2C_PP_1000_150_3_0_50%	2C_PP_1000_250_1_5_30%
	2C_PP_2000_150_3_0_30%	2C_PP_2000_150_3_0_50%	2C_PP_2000_250_1_5_30%
5	-13%	-15%	1%
10	-15%	-21%	5%
20	-15%	-25%	2%
50	-13%	-26%	2%
100	-14%	-27%	2%

$$\% = \theta_{cr,L:2000} - \theta_{cr,L:1000};$$



As variações encontradas nas temperaturas críticas em pilares de comprimentos de 2000 para 3000 mm são aumentos nas temperaturas dos mesmos. Sendo que, apresentaram-se aumentos médios de 6% para elementos com espessura da chapa igual a 1,5 mm e de 20% no caso 3 mm conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 Diferenças entre valores de temperaturas críticas para pilares biapoiados de seção C comprimentos de 2000 para 3000 mm. Parâmetro base: Altura do pilar.

Nível de restrição axial	2C_PP_2000_250_1_5_30%	2C_PP_2000_150_1_5_30%	2C_PP_2000_250_3_0_30%
	2C_PP_3000_250_1_5_30%	2C_PP_3000_150_1_5_30%	2C_PP_3000_250_3_0_30%
5	1%	-10%	3%
10	7%	1%	21%
20	9%	5%	21%
50	9%	5%	21%
100	9%	5%	21%

$$\% = \theta_{cr,L:3000} - \theta_{cr,L:2000};$$

Finalmente, quando foram comparadas as temperaturas críticas de pilares de comprimentos de 1000 e 3000 mm o comportamento das temperaturas críticas parece depender do nível de carregamento do pilar. Sendo que, para pilares com nível de carregamento igual a 30 % apresentaram aumentos nas temperaturas com valores médios de 3 % e 11% para espessuras 1,5 e 3,0 mm respectivamente. Diferentemente do encontrado no nível de carregamento igual a 30%, no nível de 50%, tiveram-se diminuições médias nas temperaturas críticas de 10% para as diferentes espessuras da chapa.

3.6.5.2 Pilares com condição de apoio semirrígida

Diferentemente do apresentado nos resultados obtidos para os pilares biapoiados, no caso dos pilares com condição de apoio semirrígida tiveram-se diminuições nas temperaturas críticas de todos pilares analisados. Essas diminuições foram em média de 20%, 13% e 31% para a comparação entre comprimentos de 1000 e 2000 mm, 2000 e 3000 mm, e 1000 e 3000 mm, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 Diferenças entre valores de temperaturas críticas para pilares de seção 2C em condição de apoio semirrígida. Parâmetro base: Altura do pilar.

Nível de restrição axial	2C_SR_1000_250_1_5_30%	2C_SR_2000_250_1_5_30%	2C_SR_1000_250_1_5_30%
	2C_SR_2000_250_1_5_30%	2C_SR_3000_250_1_5_30%	2C_SR_3000_250_1_5_30%
5	-13%	-7%	-18%
10	-17%	-13%	-28%
20	-17%	-13%	-28%
50	-18%	-14%	-29%
100	-18%	-14%	-30%

$$\% = \theta_{cr,L1} - \theta_{cr,L2}; \text{ Sendo L o comprimento do pilar (1000, 2000 ou 3000)}$$

4 CONCLUSÕES

Os modelos numéricos desenvolvidos no presente estudo, devidamente calibrados com ensaios experimentais, permitiram a realização de 288 casos que foram a base da análise paramétrica apresentada. Nas análises, foram avaliadas as influências das dimensões da seção, nível de carregamento dos pilares, condições de apoio, dimensões e diferentes níveis de restrição axial dos pilares na determinação da temperatura crítica dos pilares.

No estudo foi possível evidenciar que de modo geral o incremento da altura da alma não trouxe variações significativas nas temperaturas críticas dos pilares analisados.

Também, foi possível evidenciar que a análise das variações das espessuras das chapas dos perfis precisa levar em consideração outros parâmetros que influenciam no comportamento das peças, já que a análise isolada desse parâmetro não apresentou uma tendência evidente de aumentos ou diminuições na temperatura crítica dos pilares. Essa comparação entre diferentes espessuras apresenta diferentes comportamentos que dependem principalmente da altura da seção e do comprimento do pilar que está sendo analisado.

Do mesmo modo, a análise realizada em base ao nível de restrição à dilatação térmica permitiu concluir que para níveis maiores a 20% não se obtém grandes variações da temperatura crítica. A análise evidenciou que as variações do nível de restrição entre 5% e 20% depende para a maioria dos casos do comprimento dos pilares e condição de apoio do pilar.

As comparações realizadas permitiram encontrar uma proporção média para a diminuição das temperaturas críticas de 22% para os aumentos de cargas de serviço estudados na análise paramétrica.

Além disso, o estudo evidenciou que para pilares de diferentes comprimentos a condição de apoio tem um papel importante no comportamento da temperatura crítica. Sendo que para pilares biapoiados esse comportamento depende adicionalmente de outros parâmetros como o nível de carregamento e a espessura da chapa.

Os resultados obtidos no presente estudo permitem identificar tendências nas temperaturas críticas quando são realizadas variações em parâmetros como altura da seção e nível de carregamento. Essas tendências nos comportamentos dos pilares podem ser usadas como bases no desenvolvimento de métodos simplificados de cálculo de temperaturas críticas em pilares axialmente restringidos e um melhor entendimento do comportamento dos mesmos.

Contrariamente e como evidenciado ao longo do estudo, parâmetros como a espessura da chapa e altura do pilar quando analisados isoladamente não apresentam uma tendência evidente que permita realizar uma simplificação dos resultados obtidos. Com isto, se faz necessário o desenvolvimento de novas pesquisas para continuar a entender a influência desses parâmetros no comportamento de pilares axialmente restringidos.



5 REFERÊNCIAS

Abaqus Analysis User's Guide. (2014). Abaqus Analysis User's Guide.

ABNT NBR 14762:2010 . (2010). Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AISI S100 - 16. (2016). North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members S100 - 16. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members S100 - 16. Estados Unidos da América: The American Iron and Steel Institute (AISI) - CSA Group.

Craveiro, H. D. (2015). Fire resistance of cold-formed steel columns - Tese de doutoramento. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Duarte, N. F., Rodrigues, J. C., & Craveiro, H. D. (2016). Dissertação de Mestrado - Análise Estrutural de Elementos Comprimidos Enformados a Frio de Aço à Temperatura Ambiente e ao Fogo. *Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra*.

Feng, M., Wang, Y., & Davies, J. (2004). A Numerical Imperfection Sensitivity Study of Cold-Formed Thin-Walled Tubular Steel Columns at Uniform Elevated Temperatures. *Thin-Walled Structures* (Vol. 42, pp. 535-555).

Heva, Y. (2009). QUT Thesis (PhD). *Behaviour and design of cold-formed steel compression members at elevated temperatures*. Queensland University of Technology - Faculty of Built Environment and Engineering.

Javed, M. F., Hafizah, N., Memon, S. A., Jameel, M., & Aslam, M. (2017). Recent research on cold-formed steel beams and columns subjected to elevated temperature: A review. *Construction and Building Materials*, 144, 686-701.

Lawson, R. (1992). New developments in use of cold formed steel in buildings. *Construction and Building Materials*, Volume 6, 201-204.

Ranawaka, T., & Mahendran, M. (2009). Distortional buckling tests of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 249-259.