

ESTUDO DA FLAMBAGEM TÉRMICA EM UM PILAR METÁLICO REFORÇADO COM PRFC MODELADO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Albert Willian Faria Email: awfaria2021@gmail.com
Luís Fernando de Lima Email: fernando.lfl@hotmail.com

Resumo: Este artigo analisa a flambagem térmica em um pilar metálico esbelto, com e sem a adição de reforço estrutural com material compósito e engastado em ambas as extremidades. O material compósito utilizado é um polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) com diferentes orientações de fibras e número de camadas. O pilar metálico é modelado numericamente via Método dos Elementos Finitos no programa computacional ANSYS empregando elementos do tipo sólido e do tipo casca com respectivamente três e seis graus de liberdade mecânicos por nó. Os resultados obtidos indicam aumento da variação da temperatura necessária para a flambagem local e global quando o pilar metálico é reforçado pelo PRFC.

Palavras-chave: flambagem termomecânica, elementos finitos, polímero reforçado com fibras de carbono, estruturas de aço.

STUDY OF THERMAL BUCKLING OF A STEEL COLUMN REINFORCED WITH CFRP MODELED BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: The thermal buckling analysis of a slender steel column, with and without structural reinforcement of composite material and fixed at both ends, is presented in this study. The composite material employed is a carbon fiber reinforced polymer (CFRP) with different fiber orientations and number of layers. The steel column has been numerically modeled by the finite-element analysis software ANSYS, using solid and shell elements with three and six degrees of freedom per node, respectively. The obtained results indicate a greater temperature variation necessary to cause local and global buckling when the steel column is reinforced with CFRP.

Keywords: thermomechanical buckling, finite elements, carbon fiber reinforced polymer, steel structures.

1. Introdução

Todo sistema estrutural é projetado para suportar carregamentos em condições normais de uso. No entanto, a ocorrência de fenômenos não previstos na fase de projeto pode levar a perda de resistência mecânica (manifestada na forma de fissuras, trincas, deflexões elevadas e outros) da estrutura e evoluir para o seu colapso. Em estruturas metálicas, por exemplo, a esbeltez é uma das principais razões de seu emprego na construção civil; no entanto, essas estruturas estão sujeitas a perda de estabilidade por flambagem, perda de rigidez por variação de temperatura, corrosão metálica, entre outros. A ocorrência de altas temperaturas não previstas em projeto (tal como acontece em uma situação de incêndio) é altamente perigosa para as estruturas metálicas, uma vez que o aço sofre uma grande perda de resistência mecânica devido a diminuição do seu módulo de elasticidade, situação que contribui para a ocorrência de flambagem dos seus elementos comprimidos (DA SILVA e VASCONCELLOS, 2010).

Cada vez mais pesquisadores, tais como Beber (2003) e Bedin (2014), estudam métodos para aumentar a resistência termomecânica dos sistemas estruturais, aliando, por exemplo, aos materiais convencionais (tais como madeira, concreto e metais) os materiais compósitos, por serem mais leves, possuírem uma maior resistência termomecânica e à corrosão em relação aos materiais convencionais. Embora o seu custo de fabricação seja superior em relação aos materiais convencionais, a sua aplicação pode ser recompensada em ganho de vida útil da

estrutura (FARIA, 2006).

No setor da construção civil, os materiais compósitos são aplicados principalmente na reparação, no reforço e na reabilitação de sistemas estruturais fabricados em materiais convencionais. Por exemplo, Juvandes (1999) estudou a aplicação de mantas de fibra de carbono para o reforço e reabilitação de lajes de concreto, concluindo que o seu emprego promove na laje um aumento de sua resistência mecânica e carga crítica de fissuramento. Beber (2003), por sua vez, mostrou que o uso dessas mantas compósitas pode incrementar o ganho de carga e de rigidez à flexão em vigas de concreto armado.

Este artigo procura contribuir para o estudo da flambagem em pilares metálicos quando submetidos a variação de temperatura, chamada flambagem térmica, e ao emprego de materiais compósito colados superficialmente ao pilar metálico em vista a melhoria de sua resistência térmica, cujo estudo é pouco difundido na literatura científica.

2. Flambagem termomecânica

A flambagem é um fenômeno de instabilidade elástica caracterizado pelo deslocamento lateral da peça quando submetida à uma determinada carga de compressão. Tal fenômeno ocorre com mais facilidade em elementos esbeltos, causando uma falha súbita na estrutura e, dependendo da intensidade, podendo levar a sua ruína (HIBBELER, 2004). A carga axial máxima que uma peça suporta quando está no limite entre o equilíbrio estável e a flambagem é chamada carga crítica de flambagem (P_{cr}). Esta carga foi determinada pelo matemático suíço Leonhard Euler em 1757, através da resolução analítica de uma equação diferencial ordinária de segunda ordem. Por esta razão, a carga crítica de flambagem é frequentemente chamada de carga crítica de Euler, dada sob a forma (HIBBELER, 2004):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_e^2} \quad (1)$$

onde: E é o módulo de elasticidade (de Young) do material constituinte da peça; I é o momento de inércia do eixo em torno do qual ocorre a flambagem; l_e é o comprimento efetivo de flambagem que depende das condições de contorno da peça e do seu comprimento real L . Os valores da constante k podem ser consultados em Hibbeler (2004) e, por exemplo, para um pilar biengastado é igual à metade de seu comprimento real (L).

A flambagem global sempre ocorre em torno do eixo de maior índice de esbeltez λ , cuja expressão é apresentada no trabalho de Hibbeler (2004), da peça comprimida. Portanto, ao dimensionar um pilar, por exemplo, deve-se calcular esse índice em relação aos dois eixos, utilizando o de maior valor para o cálculo da carga crítica de Euler (Equação 1).

A variação de temperatura associada ao valor da carga crítica de Euler (Equação 1) por sua vez, pode ser facilmente deduzida dos conceitos clássicos da Resistência dos Materiais para deformações elásticas. Sendo assim, a variação da temperatura Δ_{cr} para a flambagem global da peça pode ser expressa como:

$$\Delta_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot I}{\alpha \cdot A \cdot l_e} \quad (2)$$

sendo: α o coeficiente secante de expansão térmica do material e A a área da seção transversal

da peça comprimida.

Quando constituídos por chapas finas, os perfis dos pilares metálicos geralmente têm seus elementos sujeitos à flambagem local, sendo que esse fenômeno não representa colapso estrutural, e sim uma redução significativa da rigidez da seção, apresentando geralmente um comportamento pós-crítico estável (COSTA, 2012).

3. Metodologia

Este artigo realiza uma análise numérica comparativa do efeito da variação da temperatura necessária para a flambagem de um pilar metálico, com e sem material compósito aplicado sobre as suas quatro faces.

Algumas simplificações tiveram que ser adotadas na elaboração do presente trabalho:

- o pilar metálico foi considerado isolado, ou seja, não foi abordado a sua interação com os outros elementos estruturais e de vedação;
- não foram abordadas excentricidades provenientes de carregamentos mecânicos;
- a seção geométrica do pilar foi simplificada desprezando eventuais curvaturas e soldas do perfil metálico;
- as propriedades termomecânicas do aço são independente da temperatura, e;
- a análise térmica é feita em regime permanente.

O pilar metálico utilizado é do tipo caixão, de seção transversal 200 x 200 x 5 mm e formado a frio. O material compósito utilizado para o reforço do pilar é o polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC), aplicado externamente ao pilar na forma de manta, encamisando-o.

A modelagem numérica do pilar, com e sem reforço, é feita via *Método dos Elementos Finitos* (MEF) no programa computacional ANSYS, para a obtenção da variação da temperatura necessária para ocorrer a flambagem crítica (local ou global) do pilar. Para avaliar a influência da orientação das fibras do material compósito no estudo da flambagem, foram consideradas nas simulações numéricas implementadas três diferentes tipos de mantas compósitas variando a orientação de fibras em $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ e $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ e mantendo a mesma espessura total.

Foram utilizados dois tipos elementos finitos para a discretização do pilar metálico sem reforço, um do tipo sólido e o outro do tipo casca, chamados respectivamente no ANSYS de SOLID45 e de SHELL181, e são ilustrados na Figura 1. Já no estudo do pilar reforçado com materiais compósitos, apenas o elemento multicamada do tipo casca foi utilizado.

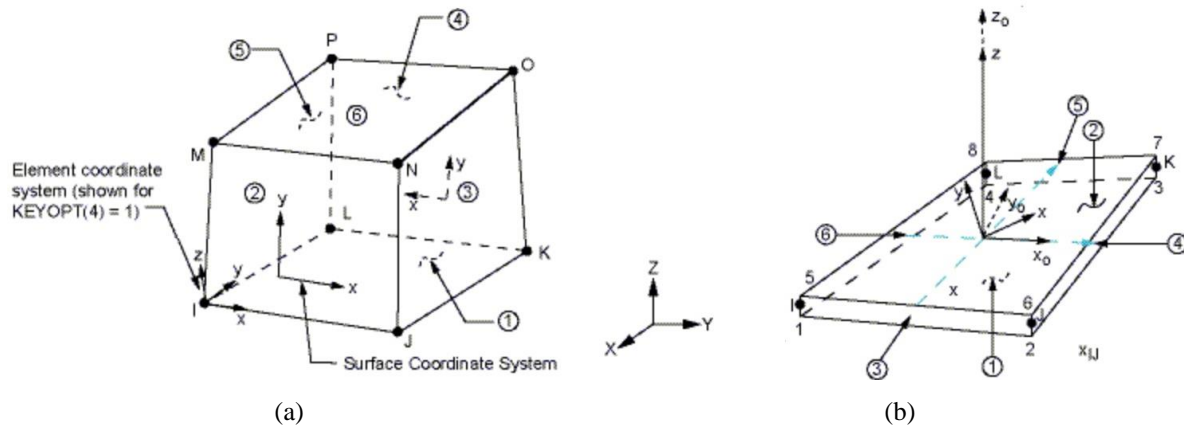


Figura 1 – Tipos de elementos finitos utilizados na modelagem do pilar metálico: sólido (a) e de casca (b).

O elemento SOLID45 (ilustrado na Figura 1(a)) apresenta oito nós e três *graus de liberdade (gdl)* por nó: três translações nas direções X, Y e Z. Já o elemento SHELL181 (ilustrado na Figura 1(b)) possui quatro nós e seis *gdl* por nó: três translações e três rotações em torno dos eixos X, Y e Z. Segundo Cassenti (2017), o elemento do tipo casca é o mais recomendado para a modelagem de estruturas de parede fina à moderadamente fina, além disso, segundo Kimura (2009), o seu uso na discretização de estruturas pode diminuir significativamente o esforço computacional de processamento da solução do problema.

4. Aplicações numéricas, resultados e discussões

Dois simulações numéricas distintas são propostas nesse artigo. Na primeira, a variação da temperatura para a flambagem do pilar metálico sem reforço é calculada, e, na segunda, é adotado um reforço termomecânico com material compósito e recalculada a variação da temperatura necessária para ocorrer a flambagem do pilar metálico reforçado, adotando reforços com diferentes orientações de fibras de carbono.

A geometria do pilar metálico proposto em ambas as simulações foi obtida do trabalho de Feng (2004), e trata-se de um pilar vazado, com seção transversal 200 mm x 200 mm x 5 mm e comprimento de 3 m. O aço utilizado no pilar possui módulo de elasticidade (E) igual a 200 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,30 e condutividade térmica (α) igual a 1.17×10^{-5} °C.

A modelagem do pilar no ANSYS foi feita utilizando elementos finitos do tipo sólido e casca. A malha do modelo utilizando o elemento sólido apresentou 8.080 nós e 24.240 *gdl*, enquanto com o elemento do tipo casca apresentou 4.040 nós e 24.240 *gdl*.

A Tabela 1 apresenta os valores da variação da temperatura necessária (Δ_{cr}) para ocorrer a flambagem global crítica do pilar metálico, sem reforço, bem como o erro percentual entre ambos os modelos: analítico (Equação 2) e numérico (empregando elementos finitos do tipo sólido e casca para a discretização do pilar metálico).

Tabela 1 – Resultados analítico e numérico da variação da temperatura crítica para a flambagem global do pilar sem reforço

	Teórico – Equação 2	SOLID45	SHELL181
Δ_{cr} (°C)	2.377,58	2.314,86	2.402,52
Erro Percentual (%)	-	2,64	1,05

A discretização do pilar através de elementos sólidos apresentou um maior número de nós e um maior tempo de processamento numérico da solução quando comparado com o modelo utilizando os elementos do tipo casca. Além disso, tal como apresentado na Tabela 1, o modelo utilizando o elemento do tipo casca apresentou um erro percentual de cálculo, quando comparado ao valor teórico utilizando a Equação 2, da variação de temperatura menor, ou seja, o uso de elementos do tipo casca para discretizar o pilar metálico representa melhor as condições reais do seu movimento, visto que, apresenta três *gdl* de rotação e três de translação. Por esses motivos, o elemento do tipo casca foi adotado para a discretização do pilar reforçado com compósito da aplicação numérica posterior.

Na primeira aplicação numérica observou-se também que a flambagem local ocorre primeiro que a global, por ser o perfil do pilar metálico de paredes finas. Os valores da variação de temperatura obtidos para flambagem local crítica são expostos na segunda aplicação numérica.

Na segunda aplicação o pilar metálico precedente é reforçado com materiais compósitos com fibras de carbono orientadas a: $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ e a $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$. No compósito com orientação de fibras a $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ a sua camada polimérica intermediária apresenta o dobro da espessura das outras duas camadas mais externas. Essas três configurações de material compósito utilizado como reforço térmico do pilar metálico possuem a mesma espessura total de 1 mm.

O material compósito (PT300/Q-122) utilizado como reforço do pilar apresenta, segundo Nasution (2015), como propriedades mecânicas: $E_{11} = E_{22} = 75,89$ GPa e $E_{33} = 11,680$ GPa, $G_{12} = 5,84$ GPa, $G_{23} = G_{13} = 5,05$ GPa, $\nu_{31} = 0,05$, $\nu_{21} = 0,04$ e $\nu_{23} = 0,32$, e, térmicas: $\alpha_1 = \alpha_2 = 2,09 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ e $\alpha_3 = 0,37 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Na Figura 2 é ilustrado a forma do modo de flambagem global crítico para uma variação de temperatura igual a $1.991,330 \text{ } ^\circ\text{C}$ e na Figura 3 a forma do modo de flambagem local crítico associado a variação de temperatura igual a $231,021 \text{ } ^\circ\text{C}$, obtidas no pilar metálico reforçado com material compósito constituído de três camadas orientadas a $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$.

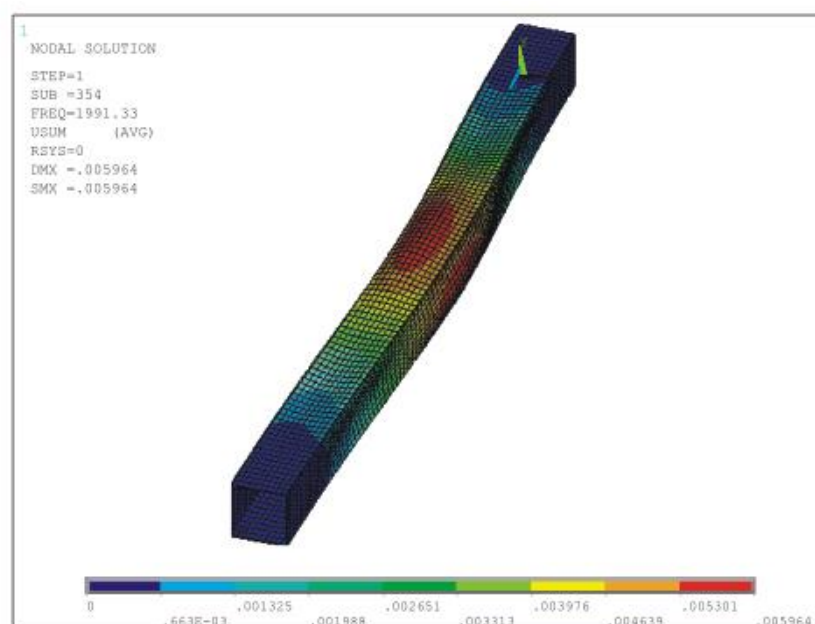


Figura 2 – Forma do primeiro modo de flambagem global crítico para o pilar metálico engastado-engastado com reforço.

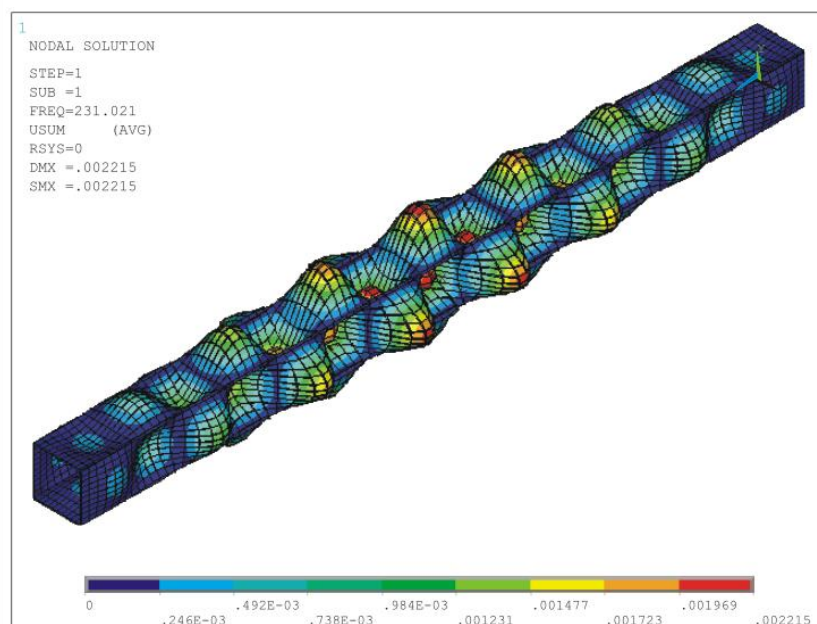


Figura 3 – Forma do primeiro modo de flambagem local crítico para o pilar metálico engastado-engastado com reforço.

Os resultados da variação de temperatura necessária para a ocorrer a flambagem local e global críticas no pilar reforçado, variando as orientações do PRFC, são dispostos na Tabela 2, que apresenta também a diferença percentual da variação de temperatura na condição de pilar metálico com reforço em comparação com os valores obtidos na condição de pilar metálico sem reforço.

Tabela 2 – Variação da temperatura necessária para a flambagem global e local críticas do pilar metálico sem e com reforço utilizando três orientações de fibras distintas

Pilar	Sem reforço (I)		Com reforço (II)			Diferença Percentual 100x(I-II)/I (%)		
	-	[0°]	[90°]	[0°/90°/0°]	[0°]	[90°]	[0°/90°/0°]	
Local (°C)	203,758	228,992	228,715	231,021	12,384	12,248	13,380	
Global (°C)	1857,970	1974,08	1973,67	1991,330	6,249	6,227	7,178	

Conforme esperado e informado na Tabela 2, o reforço empregando materiais compósitos na forma de manta encamisando o pilar metálico aumentou a variação da temperatura necessária para ocorrer as flambagens local e global críticas. Ao avaliar a diferença percentual obtido nas situações de pilar metálico com e sem reforço, constata-se que a manta compósita com três camadas de PRFC com diferentes orientações foi a mais eficiente para a redução da variação da temperatura necessária para a ocorrência de ambos os tipos de flambagem, sobretudo no caso da flambagem global crítica.

4. Conclusões

Este artigo apresenta um estudo numérico, via MEF no ANSYS, da flambagem térmica de um pilar metálico, vazado, esbelto, de paredes finas e engastado em ambas extremidades. Esse pilar metálico foi analisado nas situações sem e com reforço com manta compósita fabricada

em polímero reforçado com fibras de carbono - PRFC, variando a orientações das fibras de carbono e o número total de camadas.

O material compósito utilizado foi mais eficaz no aumento do valor da variação da temperatura necessária para a ocorrência da flambagem local crítica em comparação a flambagem global crítica. Além disso, os resultados mostraram que, no pilar esbelto e de paredes finas analisado, a flambagem local crítica ocorre primeiro que a global crítica.

Os resultados também mostraram que a aplicação do PRFC em pilares metálicos pode promover um aumento da variação da temperatura necessária para ocorrer a flambagem, local e global, e a orientação a $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ das fibras de carbono da manta de PRFC, dentre as demais orientações analisadas, foi a que apresentou maior aumento da variação da temperatura para ambas as flambagens, local e global.

Referências

- DA SILVA, R.F. & VASCONCELLOS, J.M.** *Estudo de caso: falhas por flambagem de estruturas metálicas de um pórtico submetido à situação de incêndio*. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, 2010.
- BEBER, A.J.** *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2003.
- BEDIN, M.G.** *Compósito com polietileno de baixa densidade e fibra de coco in natura e modificada*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2014.
- FARIA, A.W.** *Modelagem por elementos finitos de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica*. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, Minas Gerais, 2006.
- JUVANDES, L.F.P.** *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1999.
- HIBBELER, R.C.** *Resistência dos Materiais*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- COSTA, A.A.R.** *Estudo da Flambagem Local de Perfis U Enrijecidos em Situação de Incêndio*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2012.
- ANSYS.** *Release 9.0 Documentation*. USA, 2009.
- CASSENTI, B.** *Module 7: Thermal Buckling of a 2D Beam Fixed at Both Ends*. University of Connecticut, 2017.
- KIMURA, E.F.A.** *Análise termoestructural de pilares de aço em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, São Paulo, 2009.
- FENG, M.; WANG, Y.C. & DAVIES, J.M.** *A numerical imperfection A numerical imperfection sensitivity study of cold-formed thin-walled tubular steel columns at uniform elevated temperatures*. Thin-Walled Structures. Vol.42, p.533-555, 2004.
- COSTA SILVA, R.S.Y.** *Determinação de patologias estruturais usando modelagem numérica e transformadas de Wavelet*. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, 2011.