



**XL CILAMCE**  
IBERO-LATIN AMERICAN  
CONGRESS ON  
COMPUTATIONAL  
METHODS IN  
ENGINEERING

**NOVEMBER**  
**11-14, 2019**  
Praiamar Natal Hotel & Convention  
Natal, RN-BRAZIL

## **COLUNAS METÁLICAS EM PERFIL FORMADO À FRIO SOB COLAPSO FLEXO-TORCIONAL E TEMPERATURAS ELEVADAS**

**Antonio Renato Albuquerque Bicelli**

**Alexandre Landesmann**

*Antonio.bicelli@coc.ufrj.br*

*alandes@coc.ufrj.br*

*Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

**Dinar Camotim**

*dcamotim@civil.ist.utl.pt*

*DECivil, ICIST/Instituto Superior Técnico, UTL, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal*

**Resumo.** Este artigo apresenta e discute os resultados numéricos relativos a colunas de aço em perfis formado a frio, com seção-transversal U enrijecido (Ue) submetidos a temperaturas elevadas devido a condições acidentais de incêndio, com colapso por flambagem flexo-torcional. Tais resultados consistem na trajetória de equilíbrio da pós-flambagem elasto-plástica e cargas últimas, que foram determinadas por meio de análises não-lineares em elementos finitos de casca utilizando o código comercial ANSYS. De modo a cobrir uma ampla faixa do índice de esbeltez flexo-torcional, várias tensões de escoamento em temperatura ambiente, comprimentos de colunas e dimensões de seção-transversal foram considerados. A dependência da temperatura nas propriedades mecânicas do material é simulada usando o modelo prescrito no Eurocode 3 – parte 1.2. Aborda-se a influência da temperatura no comportamento de pós-flambagem elasto-plástica e na carga última, fornecendo um primeiro passo na busca por uma diretriz de dimensionamento eficiente e confiável para colunas sob colapso por flexo-torção em temperaturas elevadas

**Palavras-chaves:** Colunas de aço e perfis formados à frio; Flambagem global por flexo-torção; Modelos Numéricos (MEF); Temperaturas elevadas; Incêndio.

## 1. Introdução

A contínua evolução da indústria da construção civil nos últimos anos alavancou o desenvolvimento de diversas inovações tecnológicas, que buscam materiais de baixos custos, com alto controle de qualidade e maleáveis. Tais qualidades remetem aos Perfis de aço Formados à Frio (*PFF*), os quais estão difundidos em diferentes áreas da construção e são eficientemente utilizados em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, casas populares e edifícios de pequeno porte. Tem sido crescente seu uso em *light steel framing* que são painéis estruturados por *PFF*. Sua maleabilidade, devido ao emprego de chapas finas de aço permite a fabricação de diversas seções transversais abertas, entretanto se tornam propensas a vários fenômenos de instabilidade: local, distorcional e global (flexo-torção ou flexão), conforme ilustrado nas Figuras 1(a)-(d) para perfis com seção do tipo U enrijecido (*Ue*). Dependendo do comprimento do perfil e da geometria da seção transversal, qualquer um dos modos podem se tornar críticos.

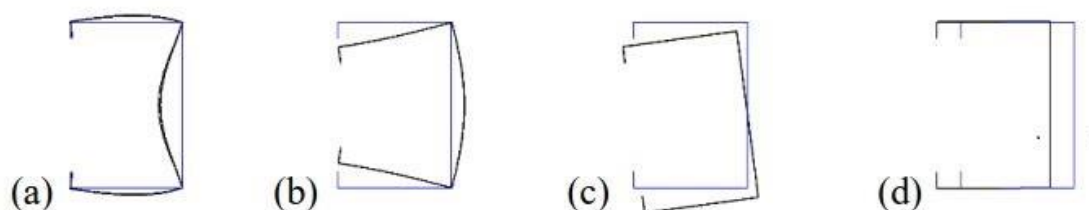


Figura 1. Deformada da seção transversal. Modos de flambagem (a) local, (b) distorcional, (c) flexo-torção e (d) flexão

Neste contexto, o estudo de *PFF* em situação de incêndio se torna necessário, pois há carência na literatura, citando-se: Heva e Mahendran [1], Dinis *et. al.* [2], Landesmann *et. al.* [3], Lee *et. al.* [4] Feng e Wang [5]. Entretanto, poucos resultados estão dirigidos à flambagem global com falha sob flexo-torção em temperaturas elevadas. Em aplicação prática, as colunas metálicas são normalmente protegidas por um material resistente ao fogo, resultando a uma distribuição de temperatura não-uniforme. Todavia, se a temperatura máxima nas colunas puder ser estimada para um incêndio, sua resistência também pode ser prevista usando métodos de projeto designados a distribuição uniforme de temperatura

Assim, o objetivo do presente artigo é apresentar e discutir os resultados obtidos sobre o desenvolvimento de uma metodologia de análise numérica em andamento (Dinis *et. al.*[6]) para simular a flambagem global, segundo o Método dos Elementos Finitos (*MEF*), para colunas de *PFF* com seção tipo *Ue*, com extremidades engastadas e submetidas a (i) compressão centrada, (ii) oito temperaturas uniformes ( $T=20/100-200-300-400-500-600-700-800$  °C), (iii) modelo constitutivo do aço referente ao Eurocode 3 – parte 1.2 [7] (as imperfeições geométricas são igualmente levadas em conta nas análises), (iv) cinco tensões de escoamento ( $\sigma_y = 75, 150, 300, 450, 600$  Mpa) selecionadas para cobrir o índice de esbelteza que variou entre 0.4 e 4.0, (v) cinco geometrias e (vi) seis comprimentos.

O resultado paramétrico envolvendo 1200 colunas metálicas sob colapso por flexo-torção é apresentado permitindo inferir sobre a influência do comportamento estrutural na pós-flambagem elasto-plástica e na resistência última sob elevadas temperaturas.

## 2. Seleção de colunas – comportamento de flambagem

A primeira etapa deste trabalho consiste em uma seleção cautelosa de seções transversais e comprimentos de colunas em *PFF* tipo *Ue*, bi-engastada, para serem analisadas em temperatura ambiente e elevadas. Este procedimento envolveu sequências de análises de flambagem elástica pelo método da “tentativa-e-erro” utilizando o código GBTul, o qual é baseado na Teoria Generalizada de Vigas (em inglês, *GBT*) [9]. Devido às suas características exclusivas de análise modal, esta ferramenta permite a decomposição dos modos de flambagem, permitindo obter geometrias com modo crítico de flambagem global sob flexo-torção (*FT*).

As geometrias selecionadas ( $b_w, b_f, b_s, t$  – ver representação esquemática na Figura 2) e os comprimentos são informados na Tabela 1. Para fins ilustrativos, a curva de assinatura é exibida na

Figura 2, mostrando a variação  $P_{cr,T}$  (carga crítica de flambagem para diferentes temperaturas) em relação ao comprimento (em escala logarítmica). Nota-se que: 3 temperaturas são apresentadas (temperatura ambiente referente a 20 °C e elevadas 400 e 600 °C), os 6 comprimentos ( $L_1$ - $L_6$ ) da coluna  $C_1$  são indicados e todas as cargas de flambagem foram calculadas para  $E_{20}=210\text{ GPa}$  (módulo de elasticidade a temperatura ambiente) e  $\nu=0.3$  (coeficiente de Poisson, assumido independente da temperatura). Vale a pena destacar que todas as curvas para temperaturas elevadas são obtidas pela translação vertical da curva mais alta (ambiente), de forma proporcional, sendo dependente exclusivamente da degradação do módulo de elasticidade produzida pela elevação da temperatura. Também é exibido o modo crítico de flambagem para  $L_1$  (FT).

Tabela 1. Geometria das colunas selecionadas sob FT: Valores de  $b_w$ ,  $b_f$ ,  $b_s$ ,  $t$  e  $L$  em mm

| Coluna | $b_w$ | $b_f$ | $b_s$ | $t$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $L_5$ | $L_6$ |
|--------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_1$  | 60    | 50    | 11    | 1.2 | 1700  | 2380  | 3060  | 3500  | 4400  | 5100  |
| $C_2$  | 100   | 60    | 10    | 2   | 2380  | 2700  | 3060  | 3500  | 4400  | 5100  |
| $C_3$  | 140   | 70    | 10    | 3   | 3000  | 3500  | 4000  | 4500  | 5000  | 5500  |
| $C_4$  | 150   | 100   | 10    | 4   | 4000  | 4500  | 5000  | 5500  | 6000  | 6500  |
| $C_5$  | 80    | 45    | 11    | 1.6 | 2500  | 2500  | 3000  | 3500  | 4000  | 4500  |

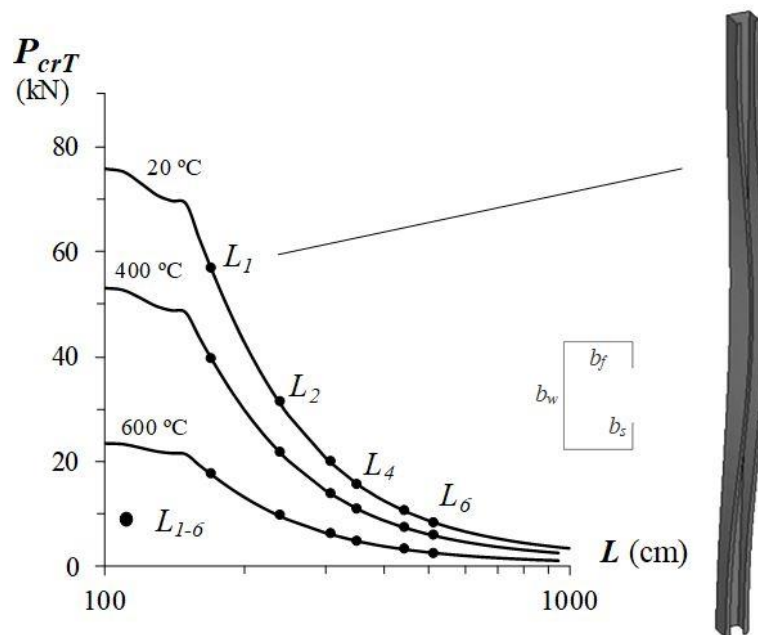


Figura 1. Variação da carga crítica de flambagem com o comprimento para  $C_1$  e deformada para  $L_1$

### 3. Modelo numérico

Os resultados da pós-flambagem e da resistência das colunas consideradas foram obtidos com análises não-lineares geométrica e física, desenvolvidas com elementos finitos de casca no programa ANSYS, validado pela análise experimental de Heva e Mahendran [1], que será abordado adiante neste trabalho.

As colunas foram discretizadas em malhas refinadas do elemento SHELL181 – elemento de casca fina com quatro nós (seis graus de liberdade por nó) com integração completa. As análises (i) foram desenvolvidas segundo técnica incremental-iterativa com emprego do método de Newton-Raphson, combinado com estratégia de controle do comprimento de arco (*arc-length*) e (ii) simulam a resposta das colunas submetidas a uma distribuição uniforme de temperatura, ou seja, consideram-se totalmente envolvidas pelas em chamas e, assim, compartilham a mesma temperatura do ar circundante, posteriormente, são comprimidas axialmente até o colapso.

O objetivo dessas análises (em regime estacionário) é a identificação da variação da resistência à compressão das colunas em função da temperatura. Dessa forma, as análises para temperaturas distintas apenas diferem nas propriedades mecânicas adotadas para o aço.

As colunas analisadas exibem condições de apoio bi-engastada, modeladas pela fixação de placas rígidas em suas extremidades, permitindo a translação axial de corpo rígido devido à aplicação da carga. A compressão axial é aplicada por meio de uma força concentrada na placa rígida, aplicada na direção do centroide da seção  $Ue$ . A força é aumentada em pequenos incrementos, por meio do procedimento automático do ANSYS.

Todas as colunas analisadas apresentam imperfeições geométricas iniciais com modo crítico ( $FT$ ) e pequena amplitude ( $L/1000$ ). Cada modo foi determinado por meio de análises preliminares de flambagem elástica, executada com a mesma malha de elementos finitos usada para realizar a análise não-linear (pós-flambagem) – este procedimento simplifica o processo de modelagem. Vale ressaltar que não foram considerados, neste trabalho, nenhum efeito de tensões residuais ou efeitos de resistência de cantos arredondados, uma vez que sua influência combinada na resistência da coluna tem se mostrado desprezível por diversos autores (e.g. Ellobody e Yooung [10]).

#### 3.1 Propriedades mecânicas do aço

A curva de tensão vs. deformação *multilinear* disponível no ANSYS é adotada para modelar o comportamento do aço relativo a várias tensões de escoamento. A lei constitutiva de *PPF* em temperaturas elevadas empregada neste trabalho é definida pelas expressões analíticas prescritas no EC3-1.2. A Figura 3(a) juntamente com a Eq. (1) possibilitam a comparação da dependência da temperatura com os fatores de redução aplicáveis ao módulo de elasticidade do aço ( $k_e = E_T/E_{20}$ ), tensão escoamento ( $k_y = \sigma_{y,T}/\sigma_{y,20}$ ) e tensão limite de proporcionalidade ( $k_p = \sigma_{p,T}/\sigma_{p,20}$ ) que são tabulados no EC3-1.2. A Figura 3(b) ilustra a diferença qualitativa entre as curvas normalizadas de tensão vs. deformação descrita no EC3-1.2 para temperatura ambiente/moderada ( $20/100$  °C),  $T=400$  °C e  $T=600$  °C. Nota-se que a não-linearidade da curva tensão-deformação aumenta consideravelmente com a temperatura (para  $T=20/100$  °C, a lei constitutiva é bilinear – material perfeitamente elástico-plástico).

$$\sigma_T = \begin{cases} \varepsilon \cdot E_T & \text{para } \varepsilon \leq \varepsilon_{p,T} \\ \sigma_{p,T} - c + (b/a) \left[ a^2 - (\varepsilon_{y,T} - \varepsilon)^2 \right]^{0.5} & \text{para } \varepsilon_{p,T} < \varepsilon < \varepsilon_{y,T} \\ \sigma_{y,T} & \text{para } \varepsilon_{y,T} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,T} \end{cases}$$

$$a^2 = (\varepsilon_{y,T} - \varepsilon_{p,T})(\varepsilon_{y,T} - \varepsilon_{p,T} + c/E_T), b^2 = c(\varepsilon_{y,T} - \varepsilon_{p,T})E_T + c^2 \quad (1)$$

$$c = \frac{(\sigma_{y,T} - \sigma_{p,T})^2}{(\varepsilon_{y,T} - \varepsilon_{p,T})E_T - 2(\sigma_{y,T} - \sigma_{p,T})}$$

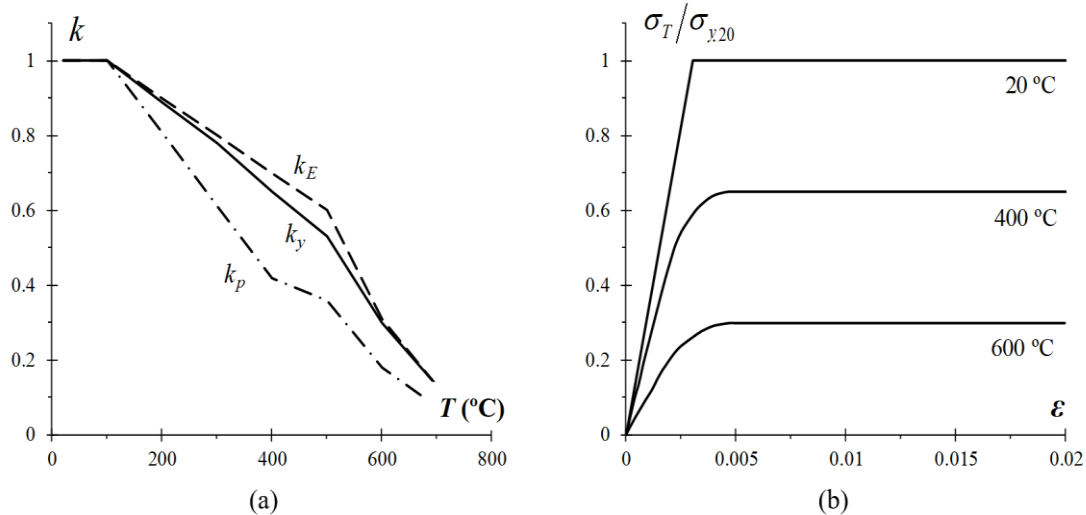


Figura 3. (a) Variação dos fatores de redução  $k_e$ ,  $k_y$ ,  $k_p$  com a temperatura para  $T < 800$  °C e (b) curva de tensão vs deformação (*PF*) para temperatura ambiente, 400-600 °C – conforme descrito no modelo proposto pelo EC3-1.2

A curva tensão vs. deformação (i) é elástica linear, com inclinação  $E_T$  até a tensão limite proporcional ( $\sigma_{p,T}$ ), então (ii) torna-se elíptica na transição entre a região plástica e elástica até a tensão de escoamento  $\sigma_{y,T}$  (onde,  $\epsilon_{y,T} = 0.002 + \sigma_{y,T}/E_T$ ) e (iii) termina em um platô até a deformação limite  $\epsilon_{u,T} = 0.15$  – em todos os casos, o modelo de plasticidade *Prandtl-Reuss* (critério de escoamento von Mises) é adotado. Observar que a tensão limite de proporcionalidade ( $\epsilon_{p,T} = \sigma_{p,T}/E_T$ ) e a forma não-linear são também influenciadas pela temperatura.

### 3.2 Aferição do modelo numérico proposto

A validação do modelo de elementos finitos é importante para concluir se o mesmo consegue simular o comportamento esperado das colunas juntamente com suas cargas últimas. Para validar o uso do modelo numérico deste trabalho, que descreve o comportamento de pós-flambagem e a resistência de colunas de *PF* em temperatura ambiente/moderado e elevadas, começa-se por replicar uma parte das simulações numéricas relatadas por Heva e Mahendran [1]. A Tabela 2 mostra os dados das colunas consideradas nesta validação, informando seus valores dimensionais, comprimentos, aço empregado e a imperfeição geométrica global (em razão do comprimento) adotados em [1].

Vale ressaltar que, além da investigação experimental, que envolveu um grande número de colunas nunca testadas, Heva e Mahendran [1] também realizaram extensa investigação numérica para temperatura ambiente e elevadas. As colunas numericamente examinadas por [1] (i) foram analisadas no código ABAQUS, (ii) incluíram a influência de tensões residuais, (iii) apresentam modo crítico (*FT*) com imperfeições globais baseadas nos valores medidos experimentalmente, e (iv) exibem  $\sigma_{y,20} = 271-515-615$  MPa,  $E_{20} = 188-206-205$  GPa e  $\nu = 0.3$ , assumindo o modelo constitutivo do aço *Ramberg-Osgood*, com fatores de redução proposto por Ranawaka e Mahendran [11] e Kankanamge [12] para espessuras nominais em *PF* de 0.95 mm (grau de aço G550) e 1.90-1.95 mm (graus de aço G450-G250).

Por outro lado, as análises numéricas realizadas neste trabalho seguiram as mesmas diretrizes abordada no parágrafo anterior, com duas exceções: (i) o código ANSYS foi adotado para simulação e (ii) as tensões residuais não foram consideradas. A Tabela 2 também mostra (i) os resultados numéricos reportados por Heva e Mahendran [1] ( $P_{u,HM}$ ), (ii) as cargas últimas obtidas neste trabalho ( $P_{u,B}$ ) e (iii) a diferença percentual entre esses valores. Nota-se que, com três exceções, as diferenças percentuais entre os valores  $P_{u,HM}$  e  $P_{u,B}$ , não ultrapassam 7.4% (com valor médio de 2.76%).

As Figuras 4(a)-(b) trazem a comparação entre as curvas de carga (força aplicada nas colunas) vs. encurtamento axial referentes ao grau de aço G450 ( $T = 20/100-700$  °C) provenientes de Heva e Mahendran [1] e deste artigo. Diante dos dados fornecidos, pode-se argumentar que o modelo de elementos finitos de casca empregado neste trabalho pode ser considerado adequadamente validado.

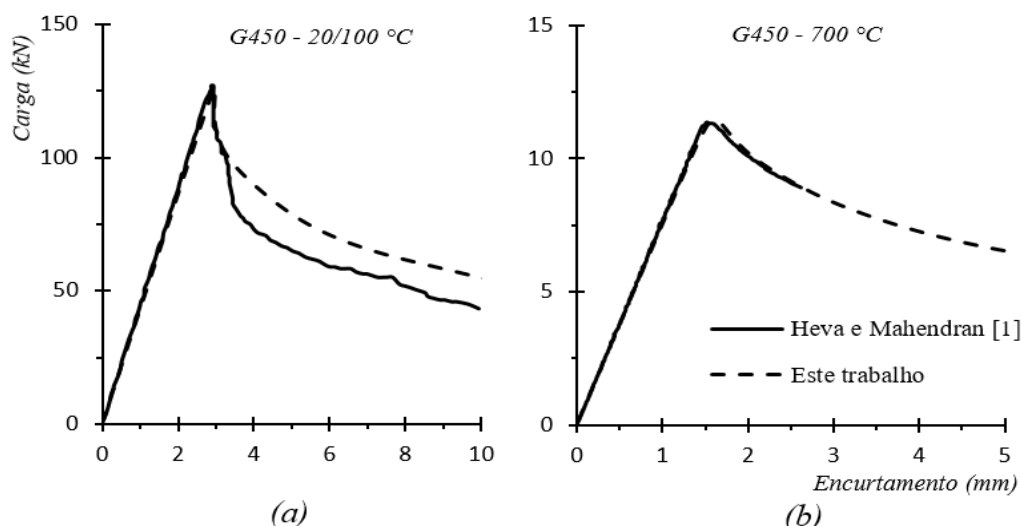


Figura 4. Comparação entre as curvas de carga (kN) vs encurtamento axial (mm), (a) temperatura ambiente/moderada e (b) 700 °C, para o aço G450.

Tabela 2. Colunas consideradas na validação e comparação entre resultados reportados e obtidos por este trabalho

| $T$<br>(°C) | $b_w$<br>(mm) | $b_f$<br>(mm) | $b_l$<br>(mm) | $t$<br>(mm) | $L$<br>(mm) | $\sigma_{y,20}$<br>(MPa) | Grau<br>do aço | Imperfeição<br>Global | $P_{u,HM}$<br>(kN) | $P_{u,B}$<br>(kN) | $\frac{P_{u,HM} - P_{u,B}}{P_{u,HM}}$ |
|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|--------------------------|----------------|-----------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------------|
| 20          | 74.92         | 49.96         | 15.00         | 1.95        | 1740        | 271                      | G250           | L/3860                | 90.7               | 90.1              | 0.6%                                  |
| 200         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 84.3               | 76.2              | 9.7%                                  |
| 300         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 62.4               | 54.8              | 12.2%                                 |
| 400         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 41.1               | 39.9              | 2.9%                                  |
| 500         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 26.6               | 28.6              | -7.4%                                 |
| 600         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 19.0               | 19.1              | -0.4%                                 |
| 700         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 10.9               | 10.7              | 1.9%                                  |
| 20          | 74.88         | 49.82         | 14.81         | 1.90        | 1740        | 515                      | G450           | L/3577                | 129.0              | 126.3             | 2.1%                                  |
| 200         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 110.0              | 108.8             | 1.1%                                  |
| 300         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 96.4               | 92.5              | 4.1%                                  |
| 400         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 78.0               | 73.6              | 5.7%                                  |
| 500         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 53.4               | 51.3              | 3.8%                                  |
| 600         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 20.5               | 18.2              | 11.3%                                 |
| 700         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 11.3               | 11.4              | -0.9%                                 |
| 20          | 57.79         | 36.91         | 8.82          | 0.95        | 1740        | 615                      | G550           | L/3437                | 25.4               | 25.4              | -0.1%                                 |
| 200         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 22.5               | 22.6              | -0.7%                                 |
| 300         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 19.3               | 19.7              | -1.9%                                 |
| 400         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 15.8               | 16.0              | -1.2%                                 |
| 600         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 6.2                | 6.5               | -5.7%                                 |
| 700         |               |               |               |             |             |                          |                |                       | 4.6                | 4.3               | 6.5%                                  |

## 4. Resultados

### 4.1 Comportamento elástico-plástico de pós-flambagem

A influência da temperatura no comportamento estrutural das colunas em PFF do tipo  $U_e$  sob FT, em relação a pós-flambagem elasto-plástica, são estudadas neste item. A Figura 5(a) exhibe a trajetória de equilíbrio não-linear para  $C_2(L_3)$ ,  $P/P_{cr,FT}$  vs  $\theta_z$  ( $P_{cr,FT} = Af_{cr,FT}$ , onde  $A$  é a área da seção transversal,  $f_{cr,FT}$  é a tensão crítica de flambagem flexo-torcional e  $\theta_z$  é a rotação em  $b_w/2$  na região central da coluna) que tem índice de esbeltez  $\lambda_{FT,T}$  (onde,  $\lambda_{FT,T} = (\sigma_{y,T} / f_{cr,FT,T})^{0.5}$ ) igual a 1.5 – os círculos brancos identificam a carga última  $P_{u,T}$  ( $P_{u,T} = Af_{u,T}$ , onde  $f_{u,T}$  é a tensão última para temperatura  $T$ ) e a curva elástica para temperatura ambiente/moderada é apresentada por razões de comparação.

Já na Figura 5(b) são apresentadas as deformadas e as configurações das tensões de von Mises no colapso ( $P = P_{u,T}$ ) para  $C_2(L_3)$  sob temperaturas  $T = 20/100-300-500-700$  °C (a fim de fornecer uma melhor visualização, apenas a metade superior da coluna é exibida). A observação destes resultados permite extrair as seguintes considerações:

- (i) Naturalmente, as trajetórias de equilíbrio da coluna “descem” à medida que a temperatura aumenta, o que implica na diminuição da carga última.
- (ii) Como os efeitos da ação térmica são desconsiderados (colunas livres para se deslocar/deformar), as falhas por FT não dependem da temperatura, portanto são praticamente idênticas para todas as colunas analisadas, além disso, nota-se que as falhas sob temperatura ambiente/moderada e elevadas são praticamente as mesmas: o colapso ocorre após o escoamento total dos cantos superiores da alma-mesa do perfil na região central da coluna. De fato, para temperaturas bastantes elevadas ( $T \geq 700$  °C), a propagação da plasticidade na metade da coluna torna-se gradualmente menor à medida que a temperatura aumenta, isso decorre diretamente da dependência da temperatura no formato da curva tensão vs. deformação – lembrando que  $k_p = 1 - 0.613 - 0.36 - 0.075$  para  $T = 20/100-300-500-700$  °C. De modo qualitativo, as tensões diminuem à medida que a temperatura aumenta e continua degradando o comportamento do aço.
- (iii) As curvas  $T \geq 600$  °C são claramente separadas (abaixo) das remanescentes  $T \leq 500$  °C. Esta observação reflete a forte degradação do aço entre 500 e 600 °C, também observado através do baixo valor do coeficiente de redução ( $k_p$ ) da tensão limite de proporcionalidade (ver Figura 2(a)).
- (iv) Nenhuma tendência (clara) foi observada em relação à influência da temperatura, geometria e tensão de escoamento na reserva de resistência da pós-flambagem elasto-plástica antes do colapso.

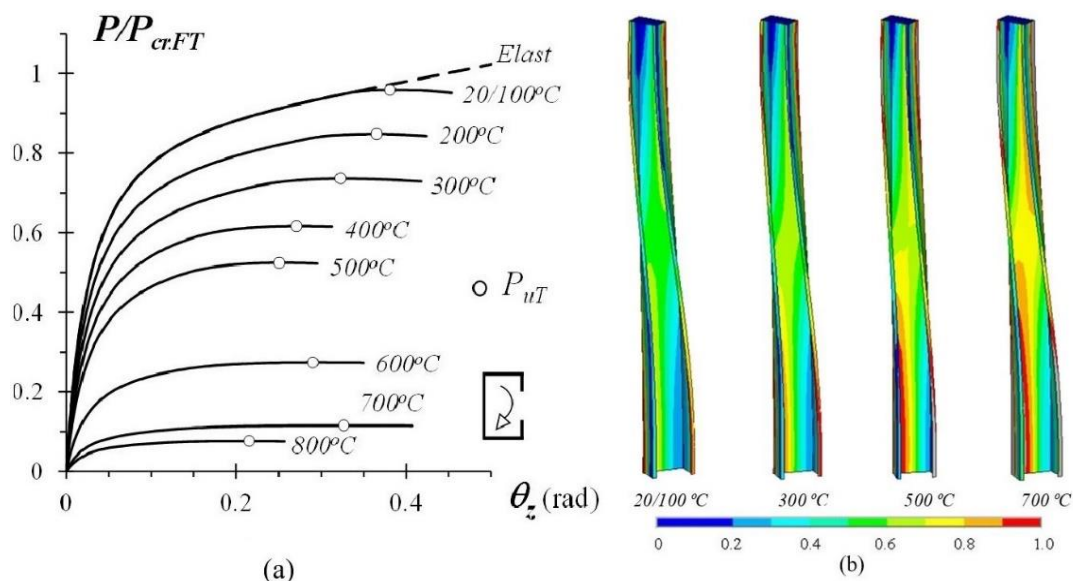


Figura 5 (a) Trajetórias de equilíbrio e (b) deformada/tensão de von Mises no colapso para  $T = 20/100-300-500-700$  °C, para coluna  $C_2(L_3)$

#### 4.2 Dados da carga última

Este item aborda os resultados do estudo paramétrico realizado para coletar dados de carga última em temperatura ambiente/moderada e elevadas, englobando 1200 colunas mostradas no item 1. Na Figura 6 são apresentados os valores obtidos numericamente neste estudo, exibidos em função da tensão última normalizada com a tensão de escoamento para diferentes temperatura vs.  $\lambda_{FTT}$  ( $f_{uT}/\sigma_{yT}$  vs  $\lambda_{FTT}$ ). Também é informado os resultados obtidos numericamente (312 colunas) e experimentalmente (39 colunas) por Heva e Mahendran [1]. A observação conjunta destes 8 gráficos remete às seguintes considerações:

- (i) Independentemente da temperatura, os valores obtidos de  $f_{uT}/\sigma_{yT}$  vs  $\lambda_{FTT}$  seguem a mesma “forma” de curva, conforme o índice de esbelteza aumenta, ou seja, a parte superior da curva ( $\lambda_{FTT} \leq 1.5$ ) possui comportamento similar a parábola de Johnson (Ziemian [13]) e a inferior ( $\lambda_{FTT} > 1.5$ ) tem “forma” da curva de Euler. Tal configuração é utilizada nas atuais curvas de resistência global de projetos segundo o Método da Resistência Direta (MRD) para o dimensionamento de PFF.
- (ii) Para  $\lambda_{FTT} \leq 1.5$ , os valores obtidos de  $f_{uT}/\sigma_{yT}$  em temperaturas elevadas ( $T > 100$  °C), são inferiores àqueles referentes a essas colunas em temperatura ambiente/moderada, entretanto esta observação não é perceptível para  $\lambda_{FTT} > 1.5$ . Além disso, a queda causada pelo aumento de temperatura não é ordenada na sequência lógica, isto é, não diminui gradativamente com a temperatura. De fato, a redução é ordenada na sequência  $T=20/100-200-300-800-400-700-500-600$  °C (os valores “fora de ordem” estão sublinhados).
- (iii) Os valores numéricos e experimentais (losangos e triângulos amarelos, respectivamente) relatadas por Heva e Mahendran [1], envolvendo temperaturas de até 700 °C, alinham-se bem com àqueles obtidos neste trabalho, mesmo que estejam relativamente acima e exibam uma dispersão vertical significativa, particularmente para os dados experimentais. As maiores dispersões são observadas para as temperaturas de 600-700 °C.



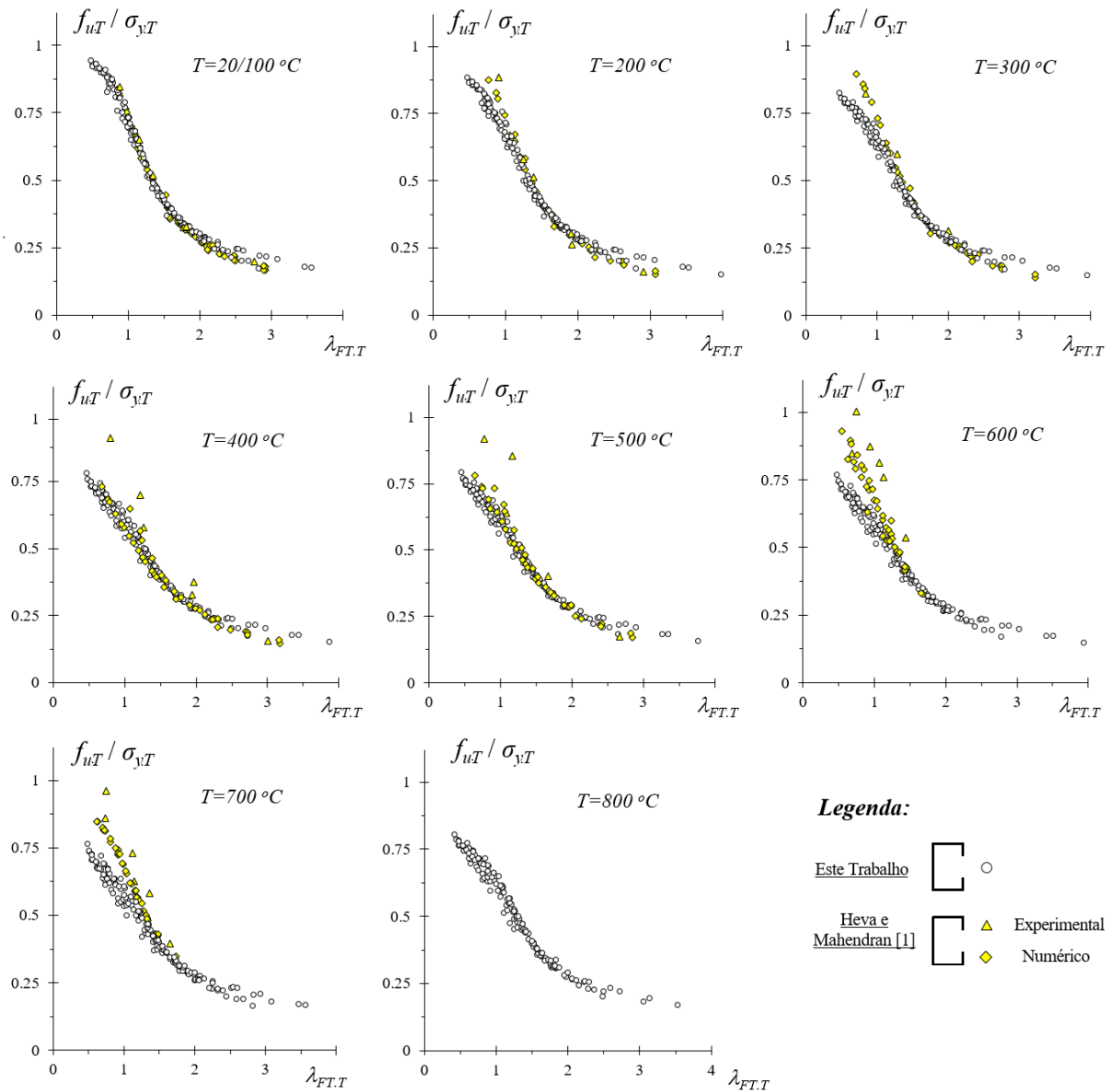


Figura 6. Gráficos referentes a tensão última normalizada em função da tensão de escoamento ( $f_{uT}/\sigma_{yT}$ ) vs.  $\lambda_{FT.T}$  para  $T=20/100-200-300-400-500-600-700-800\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 5. Considerações finais

Este artigo reportou os resultados de uma investigação numérica-computacional segundo o *MEF* de casca sobre o comportamento de pós-flambagem elasto-plástica e carga última de colunas metálicas bi-engastada, composta por *PPF* sob flexo-torção (*FT*). Estes resultados dizem respeito a 1200 colunas que exibem cinco geometrias, seis comprimentos, cinco tensões de escoamento (definidas para obter grande faixa de índice de esbeltez  $\lambda_{FTT} = 0.4-4.0$ ) e oito temperaturas uniformes ( $T=20/100-200-300-400-500-600-700-800$  °C) utilizando o modelo constitutivo do aço oriundo do EC3-1.2 para as propriedades mecânicas do material em temperaturas elevadas.

Os resultados obtidos numericamente foram apresentados e discutidos, com o intuito de adquirir conhecimento aprofundado sobre a influência da temperatura na resposta estrutural de colunas metálicas com diferente índice de esbeltez. A próxima etapa desta investigação em andamento consiste em avaliar os méritos das curvas de dimensionamento (curvas de resistência global) baseadas no Método da Resistência Direta (*MRD*) em temperatura elevadas

## Agradecimentos

O primeiro e segundo autores agradecem o apoio financeiro das instituições brasileiras CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Código Financeiro 001), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – 303860/2016-2) e FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (E-26/202.758/2017).

## Referências

- [1] B.Y. Heva, M. Mahendran. Flexural-torsional buckling tests of cold-formed steel compression members at elevated temperatures. *Steel and Composite Structures*, 14(3), pp. 205-227, 2012.
- [2] P.B. Dinis, D. Camotim, A.D. Martins. On the accuracy of the current direct strength method (DSM) design curve for columns failing in global modes. *Structural Stability Research Council*, 2018.
- [3] A. Landesmann, D. Camotin. Influência da relação constitutiva do aço para análise numérica de colunas em *PPF* com falha distorcional sob incêndio. *Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 2011.
- [4] J.H. Lee, M. Mahendran, P. Makelainen. Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003.
- [5] M. Feng, Y.C. Wang. An analysis of the structural behaviour of axially loaded full-scale cold-formed thin-walled steel structural panels tested under fire conditions. *Thin-Walled Structures*, pp. 291–332, 2005.
- [6] P.B. Dinis, D. Camotim, A. Landesmann, A.D. Martins. Accurate direct strength method (DSM) prediction of columns flexural-torsional failure loads. *Structural Stability Research Council*, 2019.
- [7] Comité Européen de Normalisation (CEN), Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-2: General Rules – *Structural Fire Design*, Brussels, 2005.
- [8] Swanson Analysis Systems (SAS), ANSYS Reference Manual (vs. 8.1), 2004.
- [9] R. Bebiano, D. Camotim, R. Gonçalves. GBTUL 2.0 – A second-generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members. *Thin-Walled Structures*, 2018
- [10] E. Ellobody, B. Young. Behavior of Cold-Formed Steel Plain Angle Columns. *Journal of Structural Engineering*, pp. 457–466, 2005.
- [11] T. Ranawaka, M. Mahendran. Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*. pp. 219–229, 2009
- [12] N.D. Kankanamge. Structural Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Beams at Elevated Temperatures. PhD thesis, Queensland University of Technology, 2010.
- [13] R. Ziemian. Guide to stability Design Criteria for Metal Structures (6th edition). John Wiley & Son, Hoboken, 2010.