

Restrição à Flambagem Local da Chapa de Aço, Fornecida Pelo Componente de Concreto em Seções Mistas Aço-concreto Submetidas à Compressão Pura

Denise Aparecida Barbosa¹, Rodrigo Barreto Caldas², Débora Coelho Cordeiro Pinheiro³,

^{1,3} VALE S/A / Gerência de Projetos Urbanos e Infraestrutura

² UFMG / Departamento de Engenharia de Estruturas

¹denise.barbosa2@vale.com, ²caldas@dees.ufmg.br, ³debora.pinheiro@vale.com

Resumo

A força de flambagem elástica local de uma chapa de aço em contato com um meio rígido de restrição, como o concreto, é invariavelmente maior do que sem um meio rígido (Uy e Bradford (1996)). As pesquisas mais recentes (Huang *et al.* (2019), Song *et al.* (2019)) consideram na modelagem computacional de seções caixa de aço com um componente de concreto, a interação de contato (não linear) entre a chapa de aço e o componente de concreto (elemento sólido). Assim, a análise pós-crítica estática usando o método de Riks frequentemente apresenta problemas de convergência, e a análise quase-estática é usada para obter a solução do problema, o que aumenta o tempo computacional. Portanto, o objetivo do presente trabalho é validar a simulação das restrições à flambagem local da chapa de aço, por meio de apoios de engastes, fornecidos pelo componente de concreto, em seções mistas de aço-concreto submetidas à compressão pura. Os pilares em seção caixa de aço preenchidas com concreto estudadas por Huang *et al.* (2019) foram adotadas no presente estudo e, em seguida, analisadas numericamente no programa Abaqus pelo método de Riks, a fim de simular as restrições fornecidas pelo concreto à flambagem local da chapa de aço. Os resultados numéricos obtidos (curvas "força versus deslocamento") no presente estudo foram comparados com os resultados numéricos e experimentais obtidos por Huang *et al.* (2019), além da norma EN 1993-1-5: 2006. Portanto, a consideração de apoios de engastes em linhas nodais para simular as restrições à flambagem local na chapa de aço, fornecidas pelo componente de concreto, foi validada numericamente.

Palavras-chave

Compressão, Flambagem, Meio rígido, Mistas aço-concreto.

Introdução

O concreto em contato com uma chapa de aço restringe a formação livre de ondas de flambagem na chapa e força-as a se formarem para fora do concreto, o que aumenta a carga de flambagem elástica local da chapa de aço. (Uy e Bradford (1996)).

A Figura 1 mostra os deslocamentos de flambagem local de uma chapa de aço fina em contato com um meio rígido. Portanto, as condições de contorno para as bordas carregadas sendo consideradas engastadas representam o modelo de flambagem mostrado na Figura 1, uma vez que apenas o comprimento da meia-onda é considerado. (Uy e Bradford (1996))

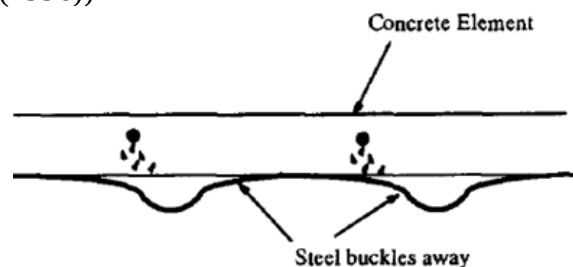


Figura 1 – Modo de flambagem da chapa de aço restringida pelo concreto (Uy e Bradford (1996))

Assim, a presença do componente de concreto em um pilar de seção caixa de aço preenchida com concreto fornece restrições internas na seção de aço. Pesquisas anteriores (Wright (1993) e Uy (2001)) mostram que as paredes de uma seção caixa podem flambar individualmente sem interação, então cada parede em contato com o concreto pode ser tratada como um elemento de chapa interna com todas as bordas engastadas, e que a carga mínima de flambagem elástica local de uma chapa de aço com todas as bordas engastadas e submetida à compressão pura ocorre para uma razão de aspecto igual a 1,0.

Portanto, na presente validação das restrições à flambagem local da chapa de aço fornecidas pelo componente de concreto, para simular as restrições transversais (Figura 2 (a)) e longitudinais (Figura 2 (b)), foram usados apoios de engaste ao longo das quatro bordas do pilar caixa e em linhas nodais ao longo das faces do pilar, respectivamente, com o objetivo de formar chapas com as quatro bordas engastadas. Para que a carga mínima de flambagem elástica local seja fornecida, a razão de aspecto das chapas engastadas foi considerada igual a 1,0.

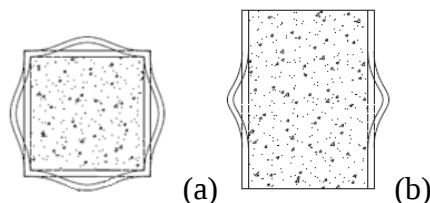


Figura 2 – Modos de flambagem em uma seção caixa: transversal (a) longitudinal (b)

Os pilares em seção caixa de aço preenchidas com concreto estudadas por Huang *et al.* (2019) foram adotadas no presente estudo a fim de validar a simulação das restrições à flambagem local da chapa de aço fornecidas pelo componente de concreto, em seções mistas de aço-concreto submetidas à compressão pura, por meio de apoios de engaste.

Modelos experimentais e numéricos desenvolvidos por Huang *et al.* (2019), e o presente modelo numérico

O modelo de elementos finitos do presente estudo foi desenvolvido usando o programa ABAQUS / Standard para simular a flambagem local e a resposta pós-flambagem dos pilares em seção caixa preenchida com concreto.

- **Material e geometria do modelo**

A Tabela 1 apresenta os detalhes geométricos dos protótipos estudados por Huang *et al.* (2019), com a nomenclatura HB referindo-se aos pilares sem preenchimento de concreto, e FB aos pilares com preenchimento de concreto. No presente estudo, os protótipos escolhidos foram aqueles com valores de limite de esbeltez a partir de 38.

Huang *et al.* (2019) usaram enrijecedores nas extremidades dos protótipos para garantir que a flambagem local não ocorresse nessas regiões, então no presente modelo numérico foi usada uma restrição do tipo *tie* (MPC constraint) para conectar a extremidade da seção ao ponto de referência posicionado no centro da extremidade da seção.

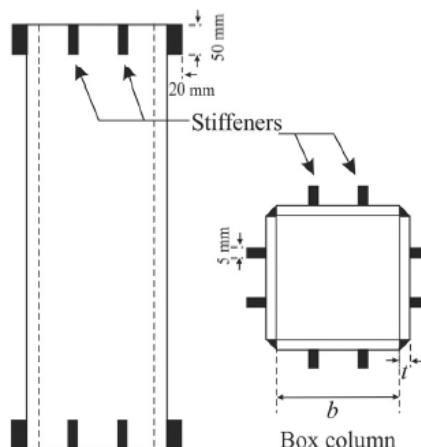


Figura 3 – Configuração dos protótipos com enrijecedores nas extremidades (Huang *et al.* (2019)) - modificada.

Tabela 1 – Detalhes geométricos dos pilares em caixa de aço de alta resistência (Huang *et al.* (2019)) - modificada.

Protótipos	b (mm)	t (mm)	b/t	L (mm)	L/b	A (mm ²)
HB80-4	240	5	48	750	3	4800
FB80-2	240	5	48	750	3	4800
FB80-3	290	5	58	900	3	5800
FB80-4	340	5	68	1050	3	6800

Os resultados dos ensaios dos protótipos de aço de alta resistência forneceram os valores médios de: módulo de elasticidade igual a 202,5 MPa, limite de escoamento a 0,2% igual a 739,8 MPa e tensão última igual a 802,8 MPa.

No presente modelo numérico, o modelo elástico-plástico multilinear com as curvas de tensão *versus* deformação obtidas dos ensaios (Figura 4) foi usado para modelar o comportamento inelástico das placas de aço. As tensões consideradas foram as tensões reais correspondentes às tensões de engenharia.

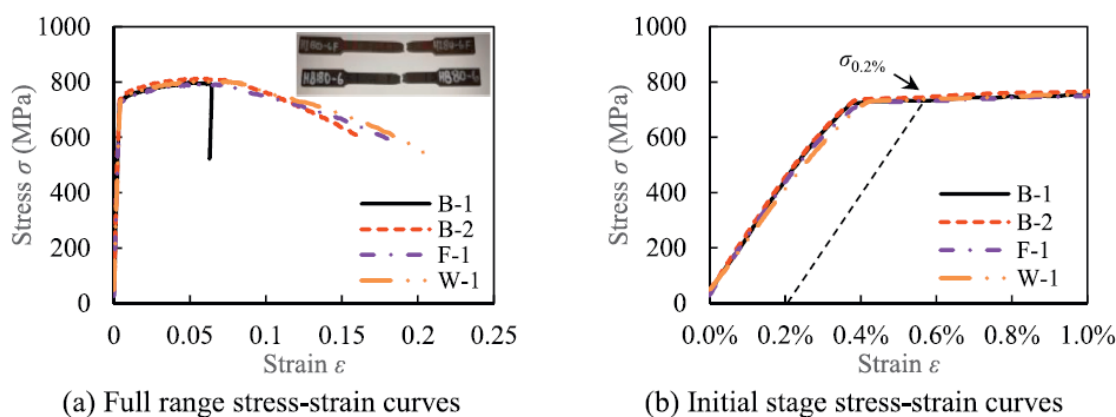


Figura 4 – Propriedades do aço estrutural de alta resistência ensaiado (Huang *et al.* (2019))

- Dimensões da malha, condições de contorno e cargas

No presente modelo, a placa de aço foi modelada por elementos de casca de 4 nós com integração reduzida (S4R). Para adotar uma malha adequada com custo computacional razoável, foi realizado um estudo de sensibilidade, e uma malha com tamanho de 7% da largura do elemento foi adotada.

Quanto às condições de contorno, foram consideradas restrições de deslocamentos (U) e rotações (UR) no modelo. Para simular as restrições longitudinais, apoios de engaste foram usados ao longo das quatro bordas (Borda 1 a 4) do pilar em caixa, e para as restrições transversais, apoios de engaste foram usados em linhas nodais (conjunto de nós 1 a 10) ao longo das faces do pilar, com o objetivo de formar placas com uma razão de aspecto igual a 1,0 e ter as quatro bordas engastadas, simulando assim o confinamento fornecido pelo meio rígido (componente de concreto).

As condições de contorno das extremidades do pilar (Nós 1 e 2) foram aplicadas por meio do ponto de referência (RP), bem como a carga de força concentrada proporcionando compressão pura no pilar, conforme mostrado na Figura 5.

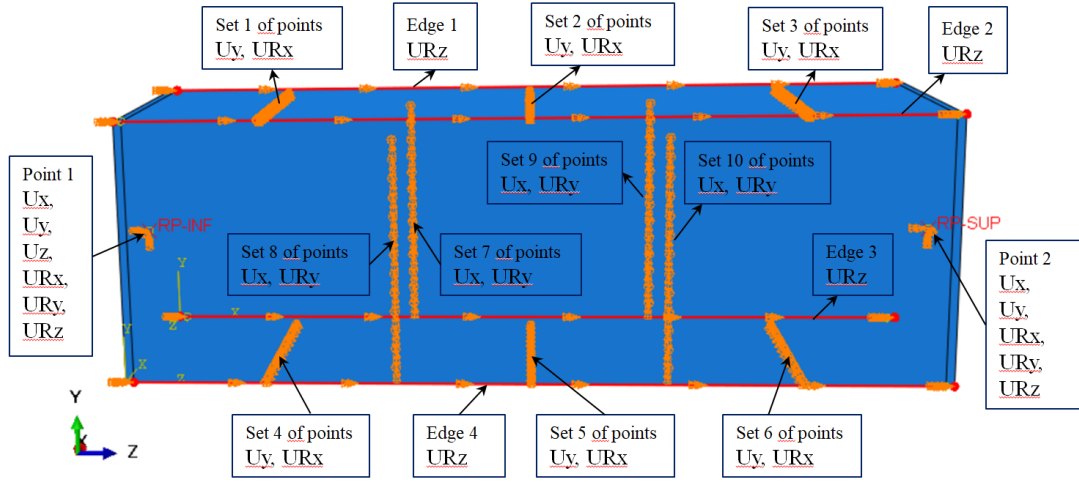


Figura 5 – Bordas, conjunto de nós, e nós restrintos

Huang *et al.* (2019) mediram as imperfeições geométricas iniciais em quatro protótipos, mas os protótipos não foram identificados (Tabela 2), então a imperfeição geométrica máxima medida no valor de 0,94 mm foi considerada no presente estudo numérico.

Tabela 2 – Imperfeições iniciais medidas nos protótipos (Huang *et al.* (2019)) – modificada.

Protótipos	Seção caixa	
	v_{max}	v_{max}/b
1	0,64	1/391
2	0,76	1/328
3	0,94	1/266
4	0,59	1/427
Máximo	0,94	1/266

Huang *et al.* (2019) adotaram no modelo numérico os valores de tensões residuais obtidos por Khan *et al.* (2016), conforme mostrado na Figura 6 e nas Equação (1) e Equação (2), no entanto, limitando a tensão residual de compressão ao valor de $(-0,1f_y)$:

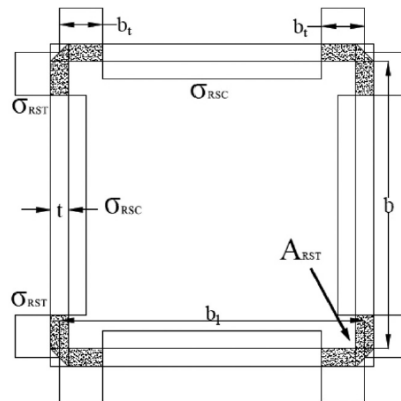


Figura 6 – Versão simplificada da distribuição das tensões residuais (Khan *et al.* (2016))

$$\sigma_{RSC} = [3,6607(b_1/t)^{-0,924}]\sigma_Y \quad (1)$$

e,

$$b_t = \frac{b_1 \sigma_{RSC}}{2(\sigma_{RST} + \sigma_{RSC})} \quad (2)$$

onde, b_1 , é a largura da seção em caixa; t , a espessura; σ_{RST} , a tensão residual de tração; σ_{RSC} , a tensão residual de compressão; b_t , a largura com tensão residual de tração; σ_Y , a tensão de escoamento do aço. A tensão residual de tração das seções fortemente soldadas e levemente soldadas pode ser considerada como um valor médio de $1,07\sigma_Y$ (MPa) e $0,72\sigma_Y$ (MPa), respectivamente (Khan *et al.* (2016)). Portanto, no presente modelo

numérico, a tensão residual de tração foi considerada como $0,72\sigma_Y$ (MPa). O valor de b_t foi verificado para obter o equilíbrio das tensões residuais.

Resultados

Os resultados (Figura 7 a Figura 9, e Tabela 3) mostram uma boa concordância entre os resultados numéricos do presente estudo e os resultados numéricos e experimentais obtidos por Huang *et al.* (2019). Observa-se na Tabela 4 que a média das razões é aproximadamente 1,0; e que seus respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação são menores que 0,1.

Tabela 3 – Capacidade resistente última obtida numericamente, experimentalmente e de acordo com a EN 1993-1-5: 2006

Protótipo	Nu (kN) EN1993-1-5:2006	Nu (kN) Numérico presente	Nu (kN) Numérico Huang <i>et al.</i>	Nu (kN) Experimental Huang <i>et al.</i>
HB80-4	1988,2	1928,9	1813,0	1733,0
FB80-4	3117,7	3169,0	3078,0	3028,3
FB80-3	3017,1	2740,6	3097,7	2904,7
FB80-2	2875,4	2852,7	2938,4	2902,6

Tabela 4 – Razões entre os resultados obtidos no presente estudo, e os obtidos por Huang *et al.* (2019)

Protótipo	Nu,EN1993 Nu,Exper.	Nu,EN1993 Nu,Num.Huang	Nu,Num,presente Nu,Exper.	Nu,Num,presente Nu,Num.Huang
HB80-4	1,147	1,097	1,113	1,064
FB80-4	1,030	1,013	1,046	1,030
FB80-3	1,039	0,974	0,944	0,885
FB80-2	0,991	0,979	0,983	0,971
média	1,052	1,016	1,021	0,987
desvio padrão	0,067	0,057	0,074	0,078
variação	0,064	0,056	0,073	0,079

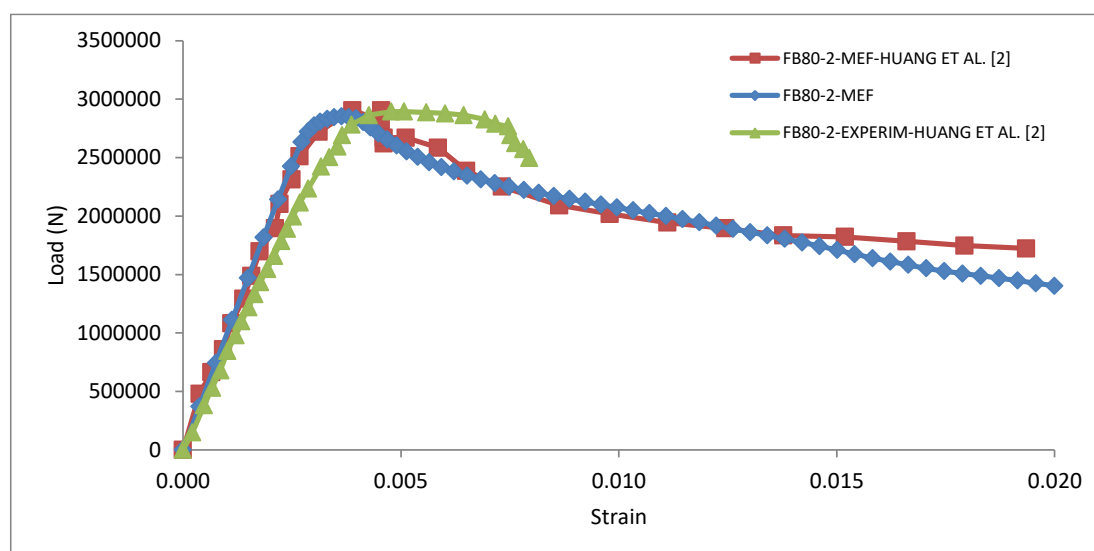


Figura 7 – Resultados numéricos do presente estudo versus resultados numérico e experimental por Huang *et al.* (2019) – protótipo FB80-2

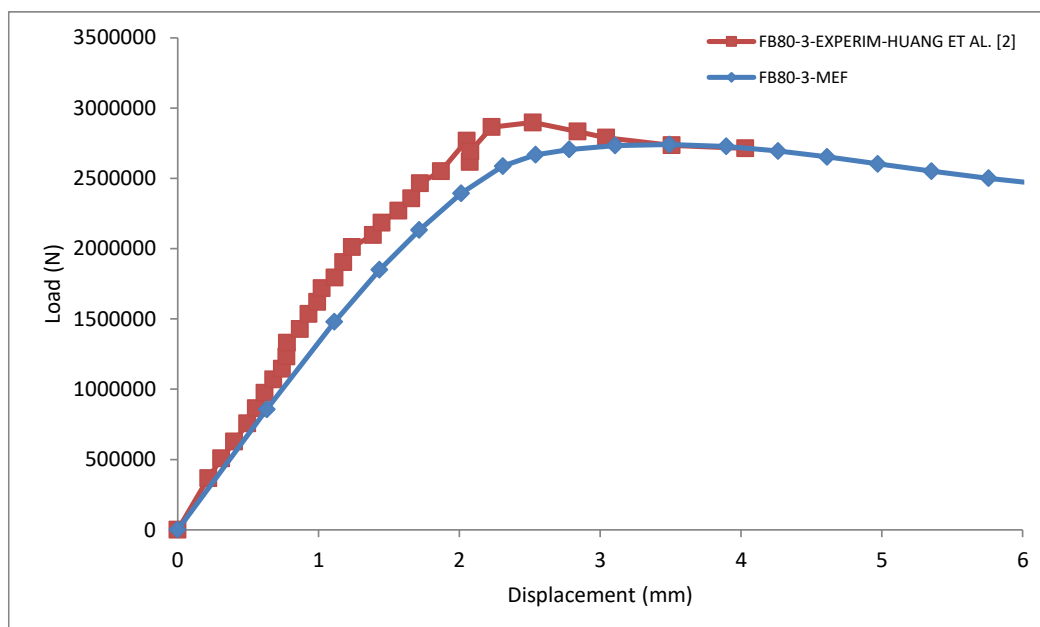


Figura 8 – Resultados numéricos do presente estudo versus resultados experimentais por Huang *et al.* (2019) – protótipo FB80-3

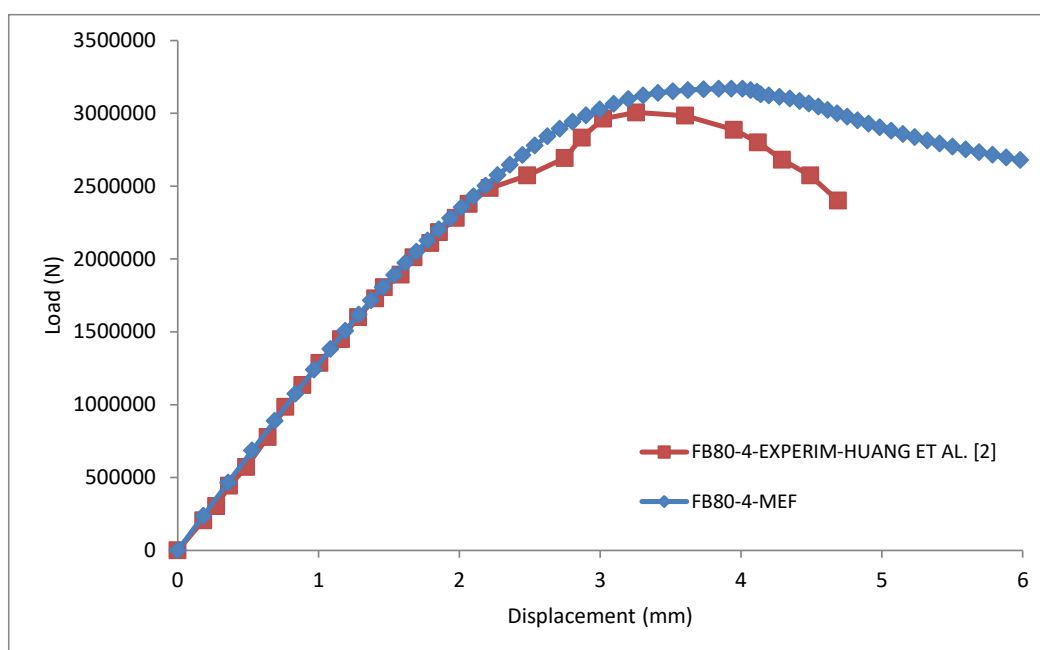


Figura 9 – Resultados numéricos do presente estudo versus resultados experimentais por Huang *et al.* (2019) – protótipo FB80-4

Conclusões

A validação numérica presente é aprovada e, portanto, a consideração de apoios de engaste em linhas nodais é aprovada para simular as restrições fornecidas pelo concreto em seções mistas de aço-concreto submetidas à compressão pura. Além disso, é comprovado que uma placa de aço em contato com um meio rígido tem sua resistência última aumentada, já que o protótipo de aço preenchido com concreto (HB80-2) proporciona uma resistência última 48% maior do que este mesmo protótipo em aço (HB80-4).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio concedido pela empresa VALE, e pelo CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e UFMG Universidade de Minas Gerais).

Referências

- CEN (European Committee for Standardization). (2006). Eurocode 3: Design of steel structures, part 1–5: General rules—Plated structural elements. EN 1993-1-5: 2006: E, incorporating corrigendum April 2009.
- Huang, Z., Li, D., Uy, B., Thai, H. T., & Hou, C. (2019). Local and post-local buckling of fabricated high-strength steel and composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 235-249.
- Khan, M., Paradowska, A., Uy, B., Mashiri, F., & Tao, Z. (2016). Residual stresses in high strength steel welded box sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 116, 55-64.
- Song, Y., Li, J., & Chen, Y. (2019). Local and post-local buckling of normal/high strength steel sections with concrete infill. *Thin-Walled Structures*, 138, 155-169.
- Uy, B., & Bradford, M. A. (1996). Elastic local buckling of steel plates in composite steel-concrete members. *Engineering Structures*, 18(3), 193-200.
- Uy, B. (2001). Local and postlocal buckling of fabricated steel and composite cross sections. *Journal of Structural Engineering*, 127(6), 666-677.
- Wright, H. D. (1993). Buckling of plates in contact with a rigid medium. *Structural Engineer*, 71(12).